



EESTI MAAÜLIKOOL  
Tehnikainstituut

**Riivo Mets**

# **ANDMEHÕIVESÜSTEEM TÄPPISPÕLLUMAJANDUSES**

## **DATA ACQUISITION SYSTEM FOR PRECISION AGRICULTURE**

Magistritöö  
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: Veli Palge, *DSc*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Riivo Mets		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Andmehõivesüsteem täppispõllumajanduses			
Lehekülgi: 82	Jooniseid: 43	Tabeleid: 7	Lisaid: 9
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse Õppetool ETIS-e teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika; 4.17 Energeetikaalased uuringud; CERC S-i kood: T125 Automatiseerimine, robotika T140 Energeetika, T170 Elektroonika Juhendaja(d): Veli Palge Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018			
<p>Keskkonnaseire hõlmab endas keskkonnaseisundi ja selle parameetrite mõõtmist, kogumist ja töötlemist. Keskkonda iseloomustavad andmed on põllumajanduse efektiivsemaks muutmisel oluliseks sisendiks. Andmete põhjal loodud mudelite alusel on võimalik korraldada taimekultuuride tulemuslikumat kasvatust, sest nii on võimalik planeerida muutuvatest keskkonnatingimustest sõltuvaid tegevusi. Valminud süsteem koosneb viiest eraldi seisvast seadmest. Nendeks on kolm andurjaama, tugijaam ja keskseade. Andurjaama projekteerimisel seati ülesanneteks, et seade peab olema suuteline mõõtma kolme erinevat temperatuuri- ja mulla niiskussanduri väärtust, töötama patareitoitel ühe vegetatsiooniperioodi, suutma andmeid edastada tugijaama võimalikult kauge vahemaa tagant kasutades selleks taskukohase hinnaga raadiosidemoodulit ja olema võimalikult kompaktne. Tugijaam on suuteline vahendama infot andurjaamade ja keskseadme vahel. Keskseade salvestab kõik saabunud infopakettid ja töötleb neid lõputöö raames valminud programmis.</p> <p>Andmehõivesüsteemi katsetamine viidi läbi ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Andurjaamad paigaldati 100 meetri raadiusse tugiseadmest. Katse tulemusena ilmnest andurjaamade töös üksikud tõrked. Katsete tulemusena tõdeti, et andmehõivesüsteem on rahuldavalt suuteline töötama väliskeskkonnas ja andma kasutajale reaajas infot õhu ja mulla olekuparameetrite kohta. Töö autor leiab, et kavandatud süsteemil on mitmeid edasiarendus võimalusi. Näiteks valmistada andurjaamale lokaalne infosalvestamise võimalus või kavandada andmehõivesüsteemile juurde häiresüsteem, mis saadaks kasutajale hädavajalikku informatsiooni.</p>			
Märksõnad: arduino, andmehõive, raadioside, täppipõllumajandus, andurid			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Riivo Mets		Curriculum: Energy Application Engineering	
Title: Data Acquisition System for Precision Agriculture			
Pages: 82	Figures: 43	Tables: 7	Appendixes: 9
Chair of Energy Application Engineering Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering; 4.17 Energetic Research (CERC S) code: T125 Automation, robotics, control engineering, T140 Energy research, T170 Electronics Supervisors: Veli Palge Place and date: Tartu 2018			
<p>Environmental data acquisition involves measuring, collecting and processing the environmental parameters. Models created on the basis of environmental data can be used, for example, for more efficient cultivation of plants, because the yield of plants depends highly on the surrounding environmental conditions. The aim of this Master's thesis is to design and construct a data acquisition system for soil and air parameters. The completed system consists of five stand-alone units which are the three sensor stations, a base station and a central unit. The author of the thesis formulated sensor station system requirements as following: to be able to measure three different temperature and soil moisture sensor values, to work on battery power during one vegetation period, to be able to transmit data from the base station as far away as possible, using an affordable radio module and be as compact as possible. The base station is capable of communicating between sensor stations and the central processing unit. The central unit stores all received information packets and processes them in the program completed under the master thesis.</p> <p>Testing of the data acquisition system was carried out between 10.04.2018-22.04.2018. Sensor stations were installed at a radius of 100 meters from the central unit. As a result of the experiment, some minor faults were detected in the sensor stations. The data acquisition system was capable of providing real-time information about air and soil parameters in the external environment. The author of the paper considers that the proposed system has several possibilities for further development. For example, prepare a local information storage device for the sensor station or an alarm system for the data acquisition system to provide the user with the essential information.</p>			
Keywords: arduino, sensor, network, wireless, precision agriculture			

# SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1. TÖÖ TEOREETILINE BAAS JA TURU-UURING .....	9
1.1. Täppispõllumajandus .....	9
1.1.1. Iseloomustus .....	9
1.1.2. Taime kasvukeskkonda iseloomustavate olekuparameetrite mõõtmise olulisus ...	11
1.2. Juhtmevaba andurivõrgu põhimõtted .....	12
1.2.1. Andurivõrgu struktuur .....	12
1.2.2. Andurjaama struktuur .....	13
1.2.3. Andurivõrkude topoloogiad .....	14
1.2.4. Juhtmevaba andurivõrgu kujundamisel esinevad nõuded ja piirangud .....	16
1.2.5. Andurseadmete seotus täppispõllumajandusega .....	16
1.3. Turu-uuring .....	17
1.3.1. Uuritavad süsteemid .....	17
1.3.2. Trellis andmehõivesüsteem .....	17
1.3.3. Sensoterra andmehõivesüsteem .....	18
1.3.4. EnviroMonitor andmehõivesüsteem .....	20
1.3.5. CropX andmehõivesüsteem .....	21
2. NÕUDED VALMIVALE SÜSTEEMILE .....	23
3. ANDURJAAMA KUJUNDAMINE .....	25
3.1. Andurjaama struktuur .....	25
3.2. Toitesüsteem .....	27
3.3. Arduino Uno Pro Mini moodul .....	28
3.4. Reaalaja kellamoodul DS3231 AT24C32 .....	29
3.5. Mullaniiskuse andurite ühendamine .....	30
3.6. Temperatuuriandurite ühendamine .....	33
3.7. Patarei pinge mõõtmine .....	33
3.8. Raadiomooduli valik .....	35
3.8.1. Valiku põhimõtted .....	35
3.8.2. Katsete kirjeldus .....	36
3.8.3. Katsetavad raadiomoodulid .....	37
3.8.4. Katsete tulemused ja mooduli valik .....	40
3.9. Andurjaama energiatarve .....	43
3.10. Andurjaama juhtprogramm .....	46
3.11. Andurjaama disain .....	47
4. TUGIJAAMA KUJUNDAMINE .....	49
4.1. Eesmärk ja tööpõhimõte .....	49
4.2. Tugijaama disain .....	51
5. KESKSEADME KUJUNDAMINE .....	52
5.1. Keskseadme eesmärk ja tööpõhimõte .....	52
5.2. Lattepanda .....	53
5.3. Kasutajaliides ja reaalaja graafikud .....	55
6. ANDMEHÕIVESÜSTEEMI KATSETAMINE .....	58
6.1. Katse kirjeldus .....	58
6.2. Katsetulemuste analüüs .....	60
6.3. Töökindlus ja tähelepanekud .....	62

7. TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	63
7.1. Andmehõivesüsteemi haldus .....	63
7.2. Andmehõivesüsteemi maksumus.....	64
7.3. Edasiarenduse võimalused .....	66
KOKKUVÕTE .....	68
KASUTATUD KIRJANDUS .....	70
LISAD .....	73
Lisa A. Temperatuuriandmed andurjaamast 1 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018.....	74
Lisa B. Mulla niiskuse andmed andurjaamast 1 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018 .....	75
Lisa C. Temperatuuriandmed andurjaamast 2 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018.....	76
Lisa D. Mulla niiskuse andmed andurjaamast 2 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018.....	77
Lisa E. Temperatuuriandmed andurjaamast 3 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018.....	78
Lisa F. Mulla niiskuse andmed andurjaamast 3 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018 .....	79
Lisa G. Mõõdetud õhuniiskuse andmed ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018 .....	80
Lisa H. Andurjaamade toitepinged ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018.....	81
Lisa I. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks .....	82

## TÄHISED JA LÜHENDID

ADC	– analoog-digitaal muundur (ingl analog-to-digital konverter)
AOUT	– analoogväljund (ingl analog output)
ASK	– amplituudmanipulatsioon (ingl amplitude-shift keying)
DDR3	– dünaamiline muutmälu (ingl double-data-rate three synchronous dynamic random access memory)
DOUT	– digitaalväljund (ingl digital output)
EEPROM	– mälutüüp (ingl electrically erasable programmable read-only memory)
E	– ühe tsükli jooksul kulutatud elektri hulk mA·h
EU	– Euroopa Liit (ingl European Union)
GND	– maandus (ingl ground)
GUI	– graafiline kasutajaliides (ingl graphical user interface)
$I_0$	– magamisrežiimi keskmine voolutugevus mA
$I_1$	– mõõtmisrežiimi keskmine voolutugevus mA
$I_2$	– saatmisrežiimi keskmine voolutugevus mA
IEC	–Rahvusvaheline Elektrotehnika Standard (ingl International Electrotechnical Commission)
Iot	– asjade Internet
LED	– valgusdiod (ingl Light-emitting diode)
$m_1$	– märja pinnase mass kg
$m_2$	– kuiva pinnase mass kg
MISO	– andmesignaal suunaga alluvalt ülemseadmele (ingl Master In Slave Out)
MOSI	– andmesignaal suunaga ülemalt alluvseadmele (ingl Master Out Slave In)
$N$	– pinnase niiskus %
$R_4$	– neljas takisti $\Omega$
$R_5$	– viies takisti $\Omega$
SCK	– ülemseadme genereeritud taktsignaal (ingl Serial Clock)
SMA	– koaksiaalse ühendusotsiku tüüp, versioon A
SPI	– sünkroonse järjestiksuhtluse liidese standard (ingl Serial Peripheral Interface)
SS	– ülemseadme juhtsignaal teavitamiseks alluvseadet soovist suhtluseks (ingl Slave Select)
$t_0$	– magamisrežiimi ajaline kestvus h
$t_1$	– mõõtmisrežiimi ajaline kestvus h
$t_2$	– saatmisrežiimi ajaline kestvus h
$U_1$	– sisendpinge V
$U_2$	– väljundpinge V
UART	–universaalne asünkroontransiiver (ingl universaal asynchronous transmitter/receiver)
USB-TTL	– universaalne järjestiksiin, mis tagab ühenduse UART liidesega (ingl Universal Serial Bus)
$V_{CC}$	– mikrolülituse toiteviik
$V_{gs}$	– pinge väljatransistori värava ( <i>gate</i> ) ja lätte ( <i>source</i> ) vahel V
WSN	– juhtmevaba andurvõrk (ingl Wireless Sensor Network)

## SISSEJUHATUS

Keskkonnaseire hõlmab endas keskkonnaseisundi ja selle parameetrite mõõtmist, kogumist ja töötlemist. Keskkonda iseloomustavad andmed on põllumajanduse efektiivsemaks muutmisel oluliseks sisendiks. Andmete põhjal loodud mudelite alusel on võimalik korraldada taimekultuuride tulemuslikumat kasvatust, sest nii on võimalik planeerida muutuvatest keskkonnatingimustest sõltuvaid tegevusi. Mudeli koostamiseks on vaja suurt andmehulka, millele tuginedes on võimalik teha järeldused taimede kasvutingimuste kohta. Keskkonnaseire on tänapäeval populaarust koguva täppispõllumajanduse üks sisenditest. Täppispõllumajanduse meetodid lubavad suurendada põllumajandusliku toodangu hulka ja kvaliteeti, kasutades samal ajal vähem ressursse (vesi, energia, väetised, pestitsiidid jne). Eesmärk on vähendada keskkonnamõju ja kulusid, ning suurendada saagikust.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on projekteerida taime kasvu mõjutavate keskkonna parameetrite andmehõivesüsteem. Süsteem peab olema suuteline täitma alljärgnevad ülesanded:

- Mulla ja ümbritseva õhu olekuparameetrite mõõtmine;
- Mõõdetud andmete toimetamine keskseadmesse;
- Andmete salvestamine keskseadmesse;
- Andmete kuvamine reaalajas kasutajasõbralikus keskkonnas.

Lõputöö idee tekkis autoril arutelus tegutseva maasikakasvatajaga, kelle arvates selline süsteem annaks põllumajanduses tegutsevatele inimestele kasulikku informatsiooni. Kogutud infot kasutades oleks võimalik põllumajanduslikke töid efektiivsemalt planeerida ja teostada. Kaasa aitas ka autori endapoolne huvi elektroonika valdkonna vastu.

Töö on samas ka aktuaalne, sest vastavalt Euroopa parlamendi uuringule seisab ülemaailmne põllumajandus lähiaastatel silmitsi mitmete oluliste väljakutsetega: kiire ülemaailmne rahvastiku kasv, kliimamuutus, kasvav nõudlus energia järele, ressursside nappus, kiirenenud linnastumine, arenenud riikide populatsiooni vananemine ja suurenenud konkurents maailmaturgudel. Põllumajanduse üha suurenev digitaliseerimine võimaldab toota taimset ja loomset päritolu tooteid suurema tõhususega ja üha väiksema keskkonnamõjuga. [1]

Lõputöö on olemuselt projekt. Püstitatud eesmärgist tulenevalt kirjeldatakse töö esimeses peajaotises täppispõllumajanduse ja juhtmevaba andurvõrkude tehnoloogiaid ja nende omavahelisi seoseid. Esimeses peajaotises antakse veel lühiülevaade hetkel turul olevatest valmissüsteemidest.

Teises peajaotises defineeritakse andmehõivesüsteemi omadused ja nõuded, millele valmis süsteem kirjanduse andmetel ja autori valikul peab vastama. Põhilised nõuded millele andmehõivesüsteem peab vastama on kompaktsus, väike energiatarve, väike omahind, juhtmevaba ühendus ja süsteem peab olema suuteline andmeid kuvama reaajas. Vastavalt formuleeritud nõuetele koostati lähteülesande probleemide plokk skeem ja pandi paika suhtlusvõrgu topoloogia. Kolmandas, neljandas ja viiendas peajaotises kirjeldab autor andmehõivesüsteemi kujundamist. Andmehõivesüsteem koosneb keskseadmest, tugijaamast ja kolmest andurjaamast, mis tervikuna moodustavad andmehõivesüsteemi. Kujundamise protsessis valitakse seadmete komponendid ja kirjeldatakse seadmete tööpõhimõtteid kasutades Eagle keskkonnas valmistatud elektriskeeme. Lõpus esitatakse seadmete programmid plokk skeemide näol.

Kuuendas peajaotises kirjeldatakse andmehõivesüsteemiga katsetamise tulemusi, kirjeldatakse katse metoodikat ja katse hetkel esinenud keskkonnatingimusi. Katse viidi läbi ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Andmete lugemise intervalliks määrati katseperioodil 10 minutit. Kaks andurjaama asetati väliskeskkonda ja üks andurjaam kasvuhoonesse. Selline lahendus tagas vähemalt ühe arendusjärgus oleva andurjaama töö kevadises Eesti kliimas. Tugijaam paigaldati lähima hoone katuseräästasse. Keskseade pandi elamu siseruumidesse. Katse tulemused on esitatud lõputöö lisades. Samuti on esitatud autoripoolsed tähelepanekud valminud andmehõivesüsteemi töö kohta. Seitsmendas peatükis kirjeldatakse andmehõivesüsteemi haldust, esitatakse süsteemi hinnakiri ja autor esitab endapoolsed ettepanekud andmehõivesüsteemi edasi arendamiseks.



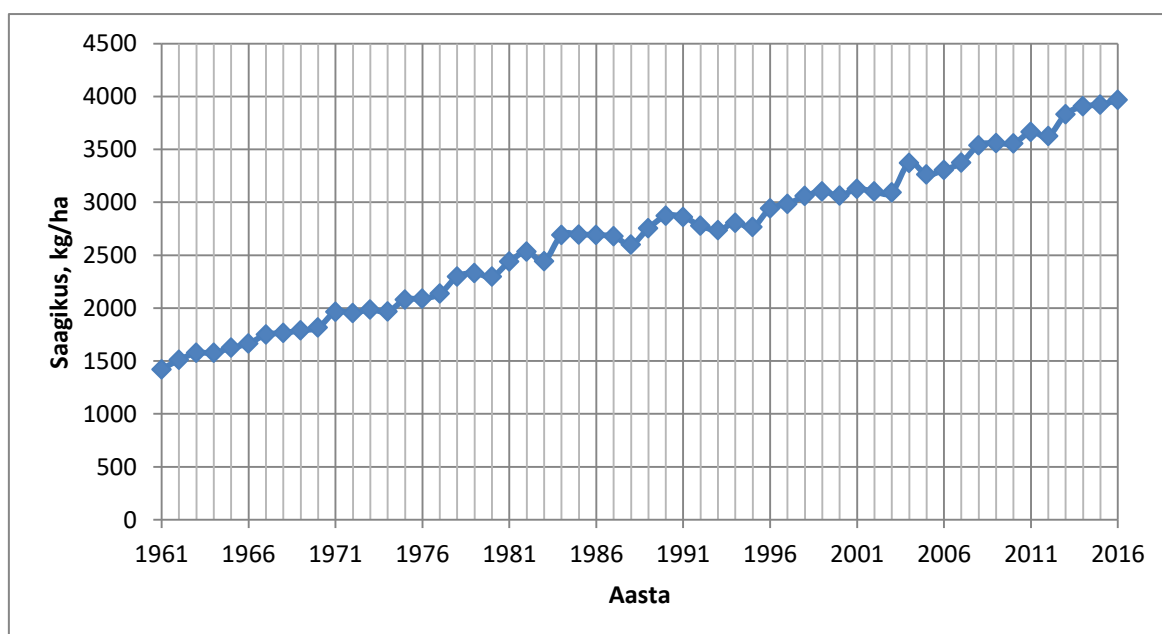
# 1. TÖÖ TEOREETILINE BAAS JA TURU-UURING

## 1.1. Täppispõllumajandus

### 1.1.1. Iseloomustus

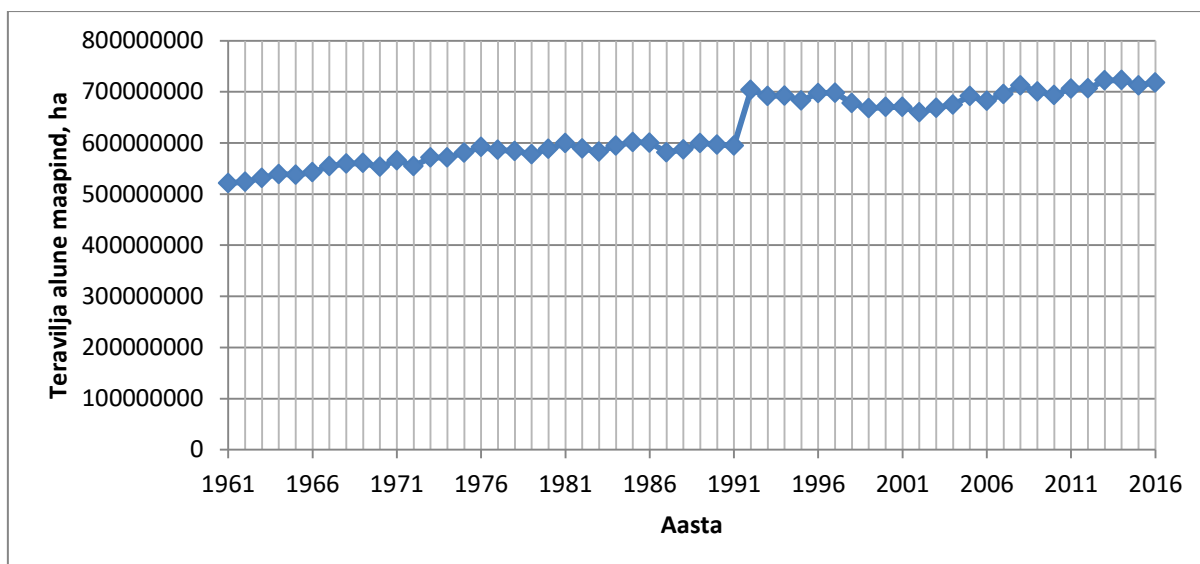
Täppispõllumajandus või täppisviljelus on põllumajanduses jätkusuutlikkust tagav majandamiseviis, mis kasutab infotehnoloogiat, satelliit-positsioneerimist, kaugseiret ja andmete kogumist. Nende tehnoloogiate kasutuselevõtu eesmärgiks on eelkõige tööstusharu efektiivsemaks muutmine läbi sisendite tasuvuse optimeerimise. Samuti loodetakse täppisviljeluse abil vähendada põllumajanduse keskkonnamõju. Jätkusuutlik majandamine aitab muuhulgas ka säilitada kriitilisi elupaiku loomadele, kaitsta vesikeskkondi ja parandada mulla tervist ja vee kvaliteeti. [2]

Viimaste aastakümnete jooksul on põllumajanduse efektiivsus tõusnud. Sellele on kindlasti kaasa aidanud täppispõllumajanduse kasutusele võtmine. Seda väljendab selgelt asjaolu, et näiteks teravilja saagikus hektari kohta on stabiilselt läbi aastate tõusnud. Seda kirjeldab joonis 1.1.



**Joonis 1.1** Maailma keskmine teravilja saagikus ühe hektari kohta 1961-2016.[3]

Saagikuse tõusust hoolimata on teravilja kasvupind viimastel aastakümnetel olnud samas suurusjärgus (joonis 1.2).



**Joonis 1.2.** Maailmas kasvatatava teravilja alune maapind 1961-2016 [4]

Täppispõllumajanduse rakendamine on olnud võimalik tänu andurtehnoloogiate arengule. Andurite abil kogutud info abil on võimalik teha järeldusi ja optimeerida erinevaid põllumajanduslikke tegevusi nagu näiteks kastmine, külvamine, väetiste lisamine ja saagi koristus.[2]

Järgnevas tabelis 1.1 on ülevaade mõningatest hetkel kasutusel olevatest täppispõllumajanduse tehnoloogiatest.

**Tabel 1.1.** Ülevaade täppispõllumajanduse tehnoloogiatest[2]

<b>Tehnoloogia</b>	<b>Tehnoloogia eesmärk</b>
<b>1</b>	<b>2</b>
Masinate automaatne juhtimine	Välistada masinate töö teede kattumist. Juhtida masinaid samu liikumistrajektoore kõikide põllutööde korral. Vähendada kemikaalide ja kütuse kasutust
Masinapargi jälgimine	Masinapargi liikumiste salvestamine. Tööliste jälgimine. Protsesside optimeerimine. Küttekulu arvestamine
Masinate trajektoori jälgimine	Jälgitakse eesmärgiga vähendada pinnase tihustumist raskete põllumajandus masinate all
Pinnase kvaliteedi jälgimine. Maapinna koostise uurimine	Andurite abil tehakse kindlaks pinnase erinevad parameetrid (ph-tase, fosfori sisaldus, jne)
Biomassi seire	Kaardistatakse taime kasvu faasid ja lämmastiku vajadus
Andurid	Automaatne taimekasvuparameetrite seire ja nende andmete põhjal tegutsemine taime saagikuse tõstmiseks.
Kaugseire tehnoloogiad	Kaugseire (peamiselt sateliitide) abil tehakse kindlaks pinnase toitainete sisaldus ja kvaliteet.
Juhtimisvahendite seadeväärtuste kohandamine vastavalt hetkeolukorrale	Juhtimisvahendite seadeväärtuste nagu näiteks väetamise ja kastmise korrigeerimine vastavalt kaardistatud pinnase omadustele.
Saagi koristuse seire	Pinnase olukorra (kuiv või niiske) jälgimine, saagi valmidusastme jälgimine.

**Tabel 1.1. jätk**

<b>1</b>	<b>2</b>
Eluskarja jälgimine	Individuaalselt looma info talletamine ja reaajas jälgimine. Andmete põhjal toiduratsioonide arvutamine ja loomade ravimine
Eluskarja transpordi jälgimine	Jälgida loomi vedavate masinate asukohti
Pindalatoetuste esitamine elektrooniliselt	Võimalik elektrooniliselt mõõta põldude pindalasid, mille vastavalt jaotada toetusi.
Andmetöötlusprogrammid	Tarkvaralised lahendused põllumajandusega seotud inimestele, et lihtsustada igapäevalisi tegevusi nagu näiteks dokumentatsioon ja masinapargi haldamine.

Tehnoloogiatega rohkusest võib järeldada, et täppispõllumajandus on kiiresti arenev valdkond. Kuna kõik inimesed vajavad oma lauale toiduained, siis viimase sajandi demograafilise plahvatuse tagajärjena vajab inimkond jätkusuutlikku süsteemi inimeste toiduainetega varustamiseks. Selle globaalse probleemi leevendamise üheks abivahendiks on täppispõllumajanduse laialdasem kasutusele võtmine.

### **1.1.2. Taime kasvukeskkonda iseloomustavate olekuparameetrite mõõtmise olulisus**

Taime kasvatamisel saadakse efektiivsem tulemus juba nelja olekuparameetri jälgimisel tehtud järeldustest. Nendeks on õhu niiskus, mulla niiskus, õhu temperatuur ja mulla temperatuur. [5]

Temperatuur mõjutab taimedel elutegevuse erinevaid protsesse, näiteks taimede kasvufaase, tolmeldamine ja idanemine. On täheldatud, et kõrgemal temperatuuril suureneb hingamise määr, mis toob kaasa suhkrusisalduse vähenemise. Madalamatel temperatuuridel aeglustub fotosünteesi aktiivsus. Õhuniiskus mõjutab taime veekaotust ja temperatuuri. Väga niiskes keskkonnas on aurustumine madal ja vesi kondenseerub taime lehe pinnale. Üleliigne niiskus suurendab omakorda seente ja bakterite tekkimise võimalusi. Mulla niiskus mõjutab oluliselt seemnete idanemist ja taimede toitainete omandamist. Liigne vesi mullas takistab gaaside tungimist pinnasesse, mis vähendab taime juure hingamist ja kasvu. Optimaalne niiskus mullas tagab juurte tervikliku kasvu ja hea taime arengu.[5]

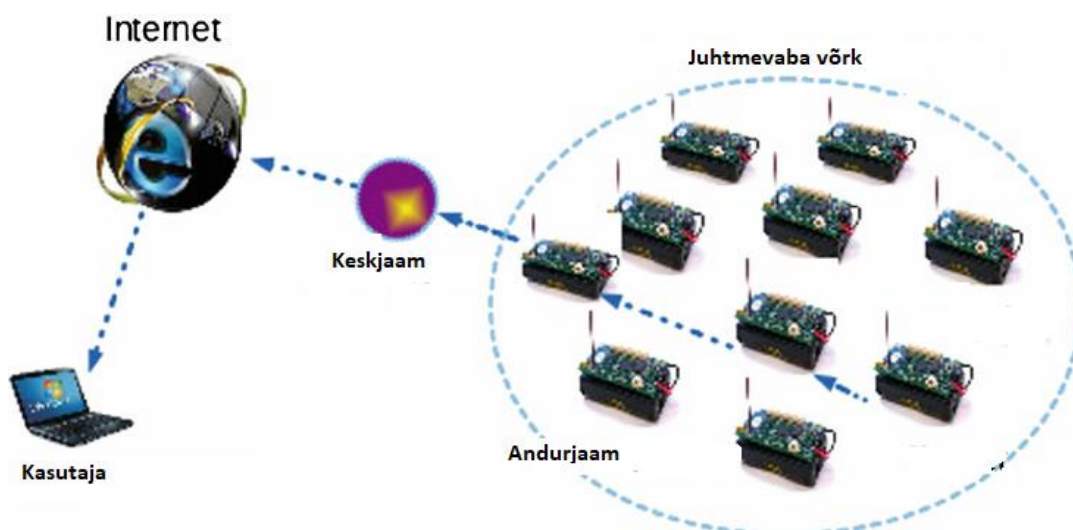
Kogudes eelnevalt mainitud olekuparameetrite väärtusi ja tehes nendest õigeid järeldusi on võimalik kasvatatava taimekultuuri saagikust tõsta.

## 1.2. Juhtmevaba andurivõrgu põhimõtted

### 1.2.1. Andurivõrgu struktuur

Mulla olekuparameetrite andmehõivesüsteemi loomiseks on vaja luua süsteem, mis suudaks andmed edastada keskseadmesse ja need salvestada. Selleks kasutatakse juhtmevaba andurivõrku *WSN (Wireless Sensor Network)*. Andurivõrk on oma olemuselt võrgustik kuhu kuuluvad seadmed tunnetavad üheskoos ümbritsevat keskkonda, võimaldades seeläbi inimeste, arvutite ja kasutatava tehnilise seadmestiku vahelist suhtlust.[6] Tüüpilised kasutuskohad on andmekogumine, seiresüsteemid, järelevalve süsteemid ja meditsiiniline telemeetria.[7]

Andurivõrk koosneb üldjuhul neljast osast (joonis 1.3): (1) erinevatest andurites koostatud andurjaamadest, mis on kindlas asukohas või teatud maa-alale laiali jaotatud, (2) kõiki andurjaamu ühendav võrk, (3) keskjaam, kuhu kõik andurjaamad oma andmed saadavad ja (4) keskjaamas asuv andmete haldamisesüsteem või arvutustarkvara.[7]



**Joonis 1.3.** Juhtmevaba andurivõrgu põhikontseptsioon [8]

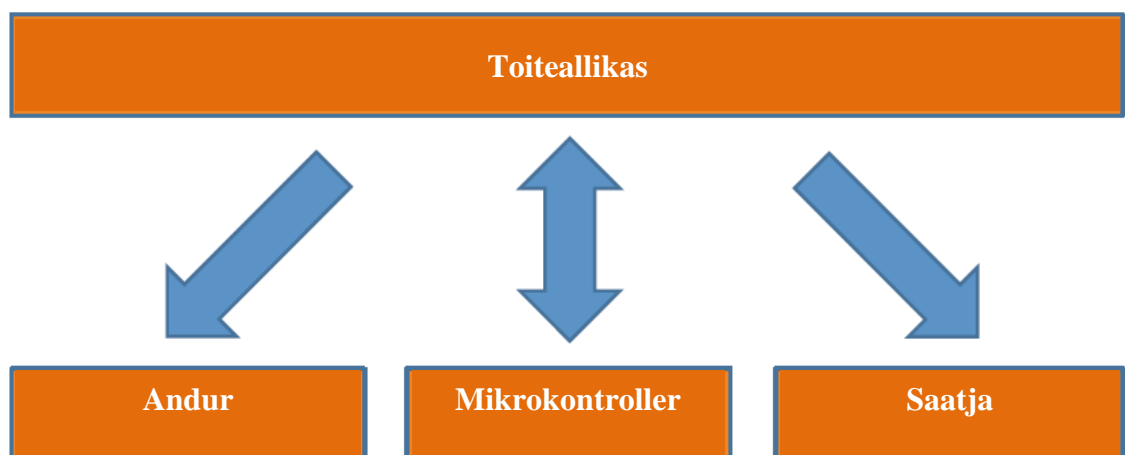
Tavaliselt koosneb juhtmevaba andurivõrk tihedalt paigutatud andurjaamadest, mis suudavad tajuda ümbritsevat keskkonda, töödelda signaale, tegeleda andmetöötlusega ja luua ühendust teise seadmega. Kõik seadmed on loogiliselt omavahel seotud, kas näiteks kakspunktprotokolli (*Point-to-Point protocol*) või ülem-alama (*Master-Slave technology*) tehnoloogia alusel. Andurjaamad edastavad keskkonnast kogutud info keskjaamadele, mis

koguvad osa informatsioonist või edastatavad enda poolt kogutud informatsiooni järgmisele keskjaamale kui selline peaks võrgus eksisteerima. [7]

Andurite võrgustike kasutuselevõtuga kaasneb palju väljakutseid. Andurivõrgu sõlmed on haavatavad ja neid kasutatakse sageli kohtades, kus on keerulised keskkonnaolud. Andurjaamadel võivad tekkida riistvaraprobleemid füüsilise kahjustuse tõttu või nende energiavarustuse hääbumise tõttu. Andurivõrgud koosnevad alates paarist andurjaamast kuni paarisaja tuhandeni. Paljud kasutuselevõetud süsteemid põhinevad põhimõttel, et andurjaamad on ühekordseks kasutamiseks mõeldud seadmed. Andurivõrgud võivad konkureerida tavapärase teabe kogumise lähenemisviisiga ainult siis, kui üksikuid andurjaamu saab valmistada odavalt. Energiatarbimine on ülimalt oluline aspekt juhtmevaba andurivõrgu loomisel. Seda tõestab suur hulk algoritme, tehnikaid ja protokolle, mis on välja töötatud energia säästmiseks, et seeläbi pikendada võrgu kasutusiga. Nagu näha on paljud andurivõrkude väljakutsed seotud piiratud energiaallikaga. Tarkvara ja riistvara kujundades peab hoolikalt analüüsima tõhusat energiakasutust mõjutavaid faktoreid. [7]

### 1.2.2. Andurjaama struktuur

Andurjaama plaat on kogu süsteemi olulisemaid osi. Andurjaama enda peamised riistvara komponendid näidatud joonisel 1.4. Nendeks on toiteplokk, andurid, mikrokontroller ja saatja [6].

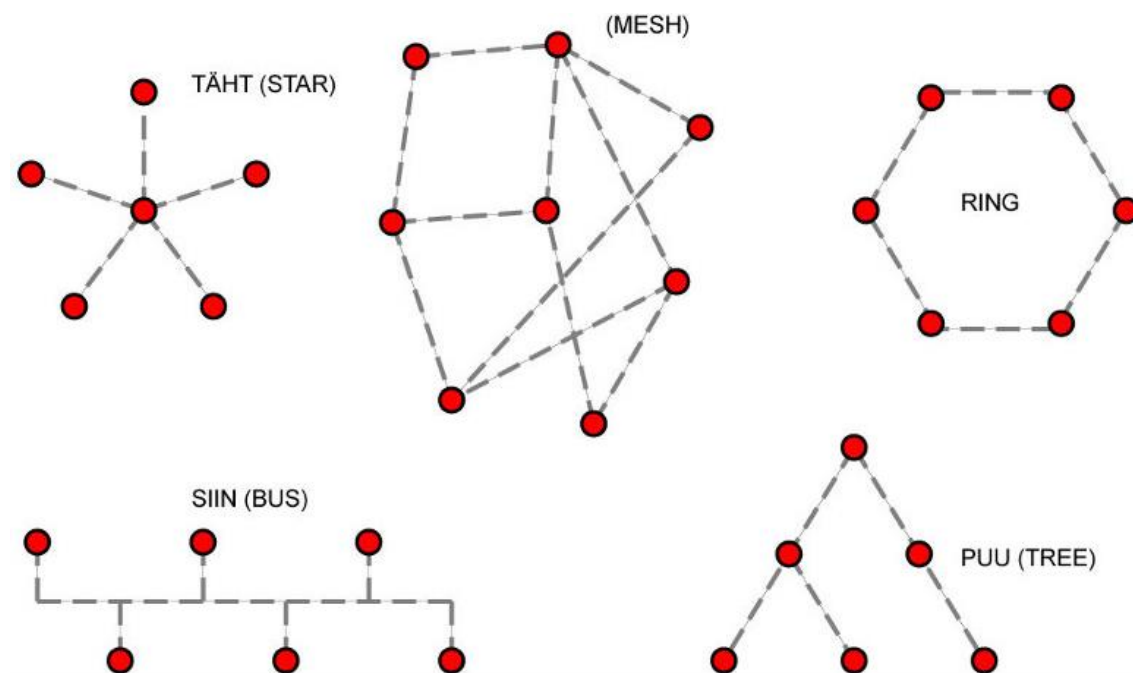


**Joonis 1.4.** Andurjaama riistvara komponendid[6]

Toiteplokki ülesandeks on varustada terve süsteem elektrienergiaga. Anduri mingisugune elektriline parameeter muutub vastavalt ümbritseva keskkonna olekuparameetritele (valgus, vibratsioon, niiskus jne). Kasutades andurseadmes olevaid abivahendeid töötleb mikrokontroller andurite elektrilised olekuparameetrid vastavalt valitud protokollidele elektrisignaali kogumikuks, mille edastab saatjale. Saatja eesmärgiks on edastada kogutud andmed keskjaamale. [6]

### 1.2.3. Andurivõrkude topoloogiad

Juhtmevabad andurivõrgud töötavad võrgu põhimõttel. Võrgu kaudu vahetatakse informatsiooni võrgus olevate seadmete vahel. Võrkusid saab liigitada topoloogia ehk arvusüsteemi geomeetrilise korralduse järgi. Peamised topoloogiad on siinvõrk, tähtvõrk, ringvõrk, hulknurkvõrk ja puuvõrk. Joonisel 1.5 on esitatud mainitud topoloogiate lihtsustatud näited.



Joonis 1.5. Võrgutopoloogiad[9]

Siinitopoloogia ehk lineaarse topoloogia puhul on omavahel kokku ühendatud kõik sõlmed (andurjaamad, keskseadmed) üheainsa siini abil. Kui seade saadab signaali teisele seadmele, siis see liigub mööda ühist siini. See tähendab, et seda signaali näevad kõik võrku ühendatud seadmed, aga ainult soovitud saaja aktsepteerib selle ja hakkab seda

signaali töötlemaks. Kirjeldatud topoloogia on olemuselt lihtne ja töötab hästi, kui kokku ühendatud seadmete hulk ei ole suur.[10]

Tähttopoloogia ehk radiaalvõrgu korral on kõik sõlmed (seadmed) ühendatud ühe tsentraalse sõlmega (arvuti, kommutaator või jaotur). Kogu kommunikatsioon toimub ainult läbi tsentraalse seadme ehk alamseadmed ei saa otse üksteisega suhelda vaid see käib läbi tsentraalse seadme. Tähtvõrgud on väga töökindlad alamseadmete vigade suhtes, sest kui ühes seadmes on rike, siis ülejäänud võrk on suuteline jätkama suhtlust ilma probleemideta. Kuid keskseadme rikke korral on infovahetus täielikult katkestatud.[10]

Ringtopoloogia puhul on seadmed ühendatud ringikujuliselt. Iga seade on ühenduses kahe kõrvalasuva seadmega. Seadmed saavad omavahel suhelda ilma otsese ühenduseta, kasutades selleks teisi seadmed. Suhtlus käib alati ühes suunas. Ringtopoloogiat on lihtne hallata, sest informatsioonivahetus toimub kindla korra järgi. Ringtopoloogia peamisi probleeme on tundlikkus komponentide võimalike rikete suhtes. Ühe seadme rivist välja langemise korral suhtlus kogu võrgus lakkab.[10]

Puutopoloogia on eelnevatest natuke keerulisem. Võrgus on üks keskseade, mis suhtleb mitme tugijaamaga. Tugijaamad omakorda saavad informatsiooni mitmelt alamseadmelt. Mitme-tasandilisus muudab selle topoloogia eelnevatest natuke keerulisemaks, sest sisaldab endas nii tähtvõrgu kui ka siinvõrgu põhimõtteid. Võrgu hierarhias madalamal asuv alamsüsteem on puuvõrk ja tugiseadmetest koosnev võrk moodustab keskseadmega siinvõrgu, kus kõik tugiseadmed on ühendatud ühte siini pidi keskseadmega. [10]

Hulknurktopoloogia ehk mesh-võrgus on kõik seadmed üksteisega otseühenduses. Kõik alamseadmed saavad suhelda kõikide võrgus olevate alamseadmega ja keskseadmega. Süsteemina töötades on see töökindel lahendus kuna info liikumisel on mitmeid erinevaid võimalusi. Ühe seadme rivist välja langemisel ei katke terve võrgu töö.[10]

Käesolevas magistritöös loodavas andmehõivesüsteemis kasutatakse puutopoloogiat.

#### **1.2.4. Juhtmevaba andurivõrgu kujundamisel esinevad nõuded ja piirangud**

Andurivõrgu kujundamisel tuleb peamiselt keskenduda seadme kompaktsuse saavutamisele ja madala energiatarbimisega andurjaama valmistamisele [6]. Need kaks omadust on olulised, kuna andurjaamad asuvad enamasti sellistes oludes, kus ühendamine üldise energiavõrguga on raskendatud ja kompaktsus lihtsustab seadmete paigaldamist.

Järgnevalt on välja toodud aspektid, millele peaks andurivõrgu projekteerimisel mõtlema:[11]

- Toiteallikas – on andurivõrgu loomisel kõige suuremaks piiravaks faktoriks, sest andurjaamad on sunnitud töötama piiratud energiaressurssidega. Tavaliselt töötavad andurjaamad patarei- või akutoitel, mis tuleb peale tühjenemist välja vahetada või täis laadida.
- Isejuhtimine – Andurivõrgud peavad toimima eraldatud piirkondades ja keerulistes keskkonnaoludes, kus puudub kokkupuude üldise infrastruktuuriga. Hooldus ja remont on raskendatud. Seetõttu peavad andurjaamad olema võimalikult isejuhtivad tehes koostööd keskseadme või teiste andurjaamadega.
- Juhtmevaba ühendus – Juhtmevabale ühendusele tuginedes peab süsteemi kujundades arvestama signaalitugevust ja levikaugust mõjutavaid tegureid, nagu näiteks seadmete vahele jäävaid takistusi ja suuremate vahemaade puhul suuremate edastusvõimsuste vajalikkust.
- Kompaktsus – Valmistatud andurjaam peab olema võimalikult kompaktne, mis muudaks selle paigaldamise ja hoiustamise lihtsaks.
- Turvalisus – Paljud andurivõrgud koguvad tundlikke andmeid, mis ei ole mõeldud igapäevasele. Juhtmevaba käitamine suurendab nende kokkupuudet pahatahtlike sissetungide ja rünnakutega.

Loetelust järeldades võib väita, et hästi funktsioneeriva andurisüsteemi loomine on piisavalt keerukas protsess ja häireteta toimimise nimel tuleb arvestada mitmete erinevate aspektidega.

#### **1.2.5. Andurseadmete seotus täppispõllumajandusega**

Kasutades andurivõrgu abil kogutud mulla niiskuse, temperatuuri ja õhuniiskuse andmeid võimaldavad täppispõllumajanduses kasutatud andurivõrgud valmistada täisautomaatseid



kastmis- ja väetamissüsteeme. Selliste süsteemide loomisel eeldatakse, et vajalik andurjaamade hulk ei ole suur. Soovitatavalt üks andurjaam 100x100 meetrilisel alal on piisav, et teha järeltööd pinnase hetkeolukorra kohta.[12]

Kahjuritõrje puhul on võimalik andurivõrgu abil reageerida kiiremini kahjurite tekkimisele ja takistada nende kiiret levikut. Eluskarja pidajatel on võimalik tänapäeval igale isendile külge panna seade, mis mõõdab reaalajas looma tervisenäitajad. Näitajate väärtuste langemisel/tõusmisel üle lubatud piirmäärade annab andmehõivesüsteem sellest märku.[12]

### **1.3.Turu-uuring**

#### **1.3.1. Uuritavad süsteemid**

Töö autor analüüsis ja võrdles hetkel maailmaturul olevaid samaotstarbelisi süsteeme. Käesolevas töös kirjeldatakse lühidalt nelja hetkel turul olevat toodet:

- Trellis juhtmevaba andmehõivesüsteem
- Sensoterra juhtmevaba andmehõivesüsteem
- EnviroMonitor juhtmevaba andmehõivesüsteem
- CropX juhtmevaba andmehõivesüsteem

Turu-uuring on oluline seetõttu, et näha hetkel turul olevaid tooteid ja nende tehnoloogilist taset.

#### **1.3.2. Trellis andmehõivesüsteem**

Trellis süsteem jälgib reaalajas mulla niiskust ja temperatuuri. Mulla niiskust on võimalik mõõta kahelt erinevalt sügavuselt[13]. Süsteem koosneb andurjaamadest ja tugijaamast, mis kogub andurjaamadelt saadud infot(joonis1.6).



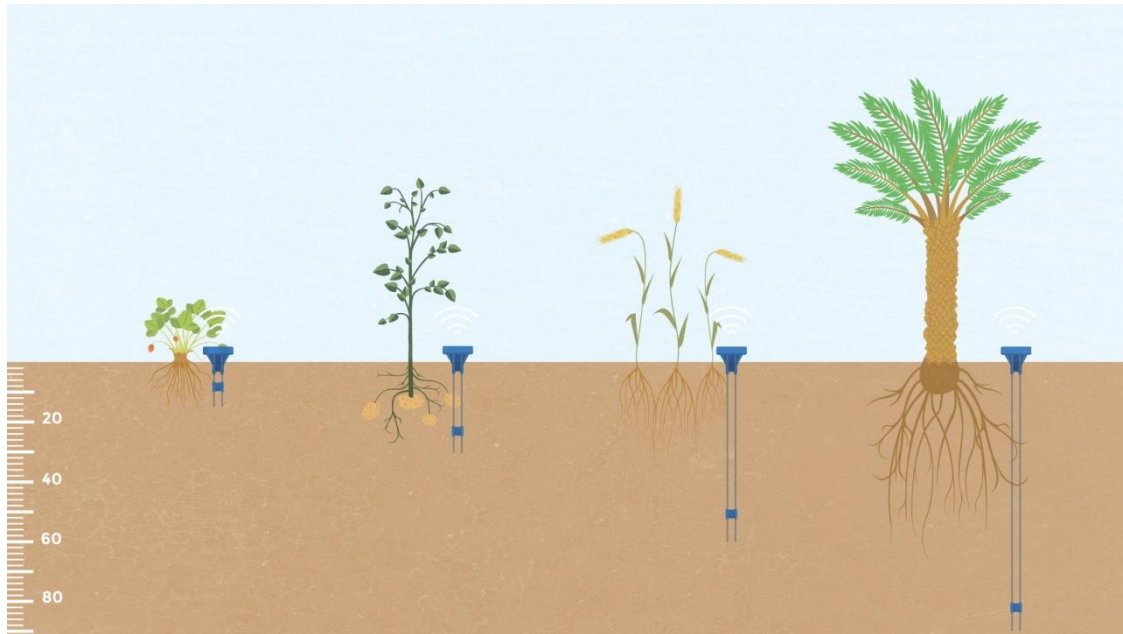
**Joonis 1.6.** Trellis süsteemi andurjaam vasakul ja tugijaam paremal[13]

Andurjaam mõõdab parameetreid iga kahe tunni tagant ja saadab mõõdetud andmed tugijaama. Tugijaam laeb saadud andmed veebi ülesse, kus on võimalik spetsiaalse tarkvaraga andmeid lugeda ja jälgida reaalajas mulla olekuparameetrite muutusi. Suhtlus käib raadiomooduliga, mis töötab sagedusel 915 MHz. Andurjaam töötab patareidel ja tootja andmetel peab patareisid vahetama kahe aasta tagant. Igal seadmel on klaaskiust antenn, mis tagab esiteks maapinnast kõrgemal olles suurema leviulatuse ja teiseks on piisavalt painduv, et suuremad põllumasinad saavad sellest üle sõita. Tugijaam töötab patareidega, mida laetakse päikesepaneeliga. Tugijaam on täiesti hooldusvaba. Tootja andmetel on tugijaam suuteline andmeid lugeda 1-2 km tagant. Tootjal on arendatud veebirakendus, kust on võimalik kõiki andmeid reaalajas jälgida ja alla laadida.[13]

Trellise süsteemi maksumus on 1300 eurot. Hinna moodustavad üks tugijaam, kaks andurjaama ja veebirakenduse hind 8-ks kuuks[13]. Autorile jäi silma kolm omadust, mis on selle süsteemi puuduseks. Esiteks mõõdetakse iga kahe tunni tagant. Selline aja-intervall võib mõningate taimesortide puhul jääda liiga suureks. Teiseks ei loeta ümbritsevat õhuniiskust, mis vastavalt eespool mainitud kirjandusele on samuti oluliseks aspektiks taimede kasvatamisel. Kolmandaks süsteem on suhteliselt kallis.

### **1.3.3. Sensoterra andmehõivesüsteem**

Sensoterra andmehõivesüsteem on mulla niiskuse andmehõivesüsteem, mis on täiesti juhtmevaba ja mille raadioside töötab põhinedes Lo-Ra tehnoloogial. Joonisel 1.7 on näha, et paigatavatel niiskusanduritel on seadistatav sügavus.



**Joonis 1.7.** Sensoterra andmehõivesüsteemi andurite paigaldus erinevatel sügavustel [14]

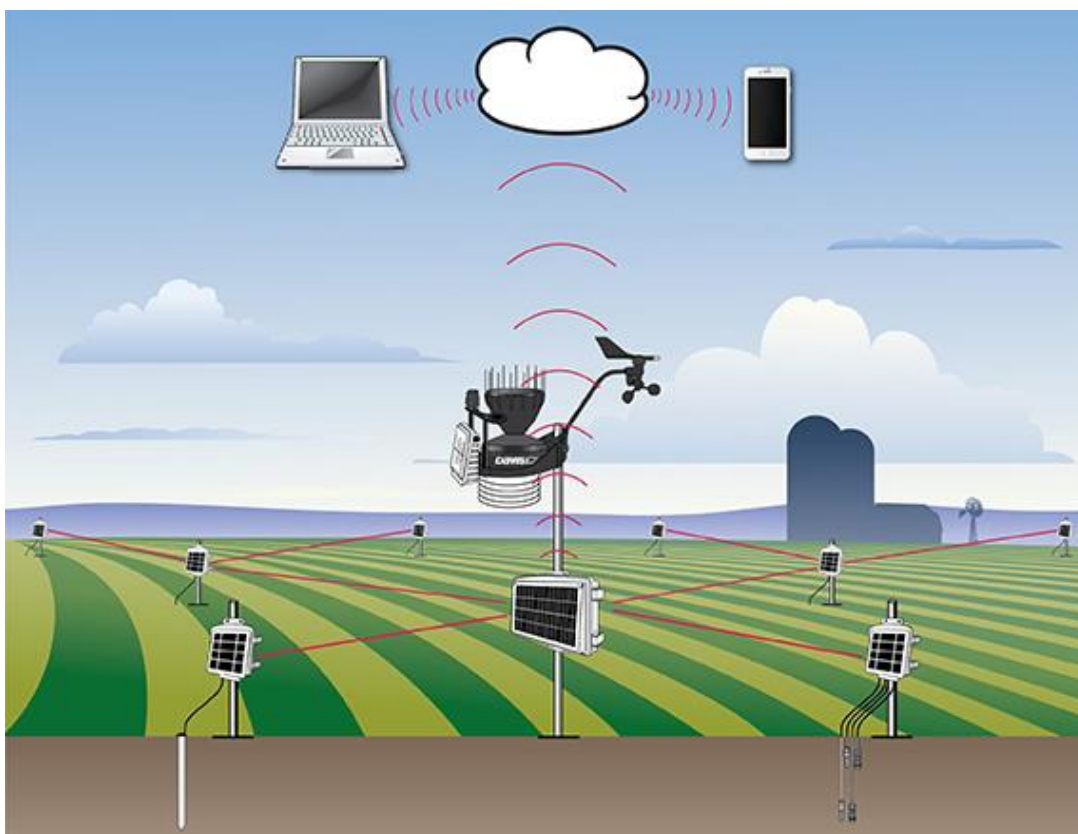
Andurjaamade disain on kompaktne ja andmeid saab Lo-Ra tehnoloogial põhineva raadiosaatjatega lugeda kuni nelja kilomeetri kauguselt. Andurjaamad töötavad patareidega, mis peaksid kindlustama andurite töö 3-10 aastaks. Andurite installatsioon on kerge, tuleb lihtsalt andur suruda maasse. Raskemaks läheb paigaldamine, kui tahetakse paigaldada andurid sügavamale maapinda. Sellisel juhul on vaja kasutada spetsiaalse puuri abi.[14]

Andmed laetakse veebi ülesse Lo-Ra tugijaama poolt[14]. Sensoterra puhul on veebirakendus ilma kuumaksuta. Tootja poolt on eelduseks, et sul on juba olemas Lo-Ra tugijaam. Kui see puudub on vaja endale see muretseda ja paigaldada. Tootja ise seda ei paku. Tootja kodulehelt on võimalik välja lugeda, et standardse sügavusega andurjaamad maksavad 120-160 eurot[14]. Lisaks tuleb endale muretseda samuti Lo-Ra tugijaam, mille maksumus jääb erinevatel tootjatel vahemikku 100-300 eurot[15]. Kahest andurjaamast ja ühest tugijaamast koosneva süsteemi maksumus jääb vahemikku 500-800 eurot.

Selle süsteemi miinuseks on see, et loetakse ainult mulla niiskust. Samuti pole terviklikku süsteemi võimalik muretseda ühest kohast. Plussiks on hea levikaugus, andurjaamade kompaktsus ja lihtne paigaldatavus.

### 1.3.4. EnviroMonitor andmehõivesüsteem

EnviroMonitor on andmehõivesüsteem, millega saab jälgida erinevaid keskkonna olekuparameetreid. Teistest eristub see süsteem selle poolest, et on võimalik ise valida, milliseid keskkonna olekuparameetreid lugeda on vaja. Eraldi on võimalik muretseda erinevat tüüpi andureid alates mulla niiskuse- ja temperatuurianduritest ja lõpetades lehe soolasusastme ja päikese kiirguse anduritega. Joonisel 1.8 on näidatud EnviroMonitor süsteemi põhimõtteskeem.



**Joonis 1.8.** EnviroMonitor andmehõivesüsteemi komponendid ja tööpõhimõtet kirjeldav skeem[16]

Süsteemi tugijaamale saab juurde ühendada ilmajaama, mille andmed on võimalik hiljem veebirakenduses jälgida. Ilmajaama olemasolu annab kasutajale suurema andmepagasi, mille najal teha põllumajanduslikke otsuseid. Tugijaam ja andurjaam on suutelised ideaaltingimustes suhtlema kuni 1200 meetri kauguselt. Üks tugijaam on suuteline infot vastu võtma kuni 20 andurjaamalt. Ühele andurjaamale on võimalik külge ühendada kuni neli enda poolt valitud andurit. Kõik jaamad on varustatud päikese paneelidega. Süsteem toimib ise hulknurktopoloogia alusel ehk andurjaamad on suutelised omavahel suhtlema

tagades sellega info jõudmise tugijaamani isegi, kui andurjaama ja tugijaama vahele jäävad takistused, mis võivad signaali levikvaliteeti vähendada. Tootja poolt on välja arendatud tasuta veebirakendus, kus saab kõiki kogutuid andmeid reaalajas jälgida.[16]

Süsteemi maksumus algab 1500 eurost kuhu sisse kuulub ilmajaam, tugijaam, üks andurjaam ja üks andur [16]. Suurema süsteem ülesseadmiseks on vaja mitme tuhande euro väärtuses investeringut. Süsteemi omapära on kindlasti erinevad ja vahetatavad andurid, samuti vahemaa, mille tagant on tugi-ja andurjaam võimelised omavahel suhtlema. Sellega muidugi kaasneb see, et kogu süsteemi maksumus on suur. Miinuseks on autori arvates suured andurjaamad, mis võivad segada erinevate põllumajandusmasinate tööd.

### **1.3.5. CropX andmehõivesüsteem**

CropX pakub integreeritud riist- ja tarkvarasüsteemi mulla niiskuse, temperatuuri ja elektrijuhtivuse mõõtmiseks ning nende andmete saatmiseks pilve, kuhu pääseb juurde igast mobiiltelefonist või võrguühendusega varustatud seadmest. Süsteem on teistest erinev selle poolest, et andurjaam ise on nii keskseade kui ka tugijaam, mis laeb andmed ülesse pilve (joonis 1.9).



**Joonis 1.9.** CropX andmehõivesüsteemi andurjaam [17]

Süsteemi abil saab jälgida reaalajas mulla niiskust ja temperatuuri kuni kolmel eri sügavusel. Paigaldamiseks on eelnevalt vaja maasse puurida ava kuhu hiljem saab paigaldada andurjaama. Andurjaama maapealne osa on väikeste mõõtmetega ja kompaktne

ja kinnitatav antenn on painduv. Andmeid mõõdetakse iga 150 ms järelt, mille alusel leitakse iga 30 minuti tagant keskmine ja see tulemus laetakse ülesse pilve. Andurjaam töötab vahetavatel patareidel. Ühe kõige tavalisema andurjaama maksumus on 600 eurot. Suuremate võimalustega ja täpsema andurjaama hind on 900 eurot. Lisaks tahtes jälgida oma seadmeid reaajas ükskõik kus kohas olles tuleb tarkvara eest juurde maksta aastas kuni 275 eurot. [17]

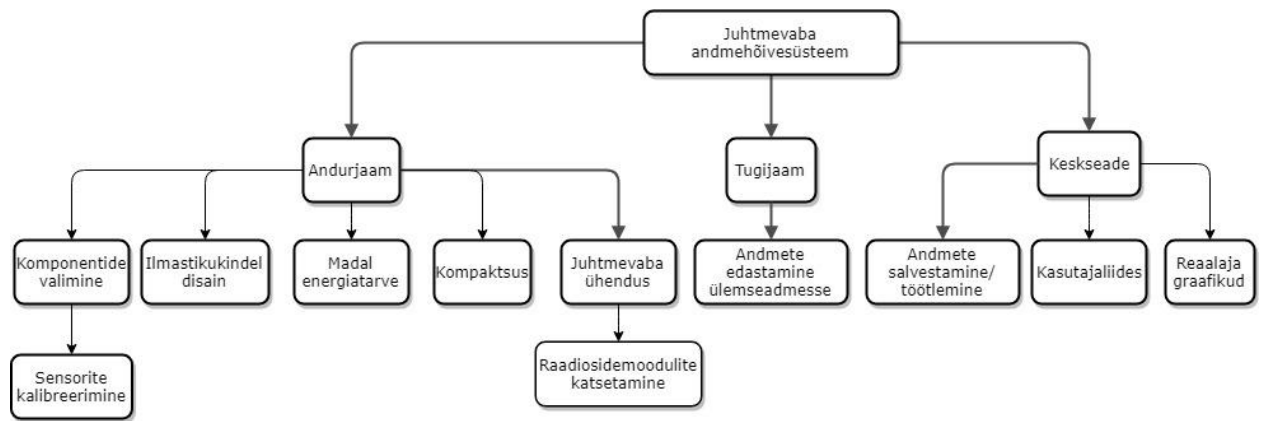
Süsteemi plussideks on seadmete vähesus, mille tagab tugijaama ja andurjaama asetsemine ühes korpuses. Negatiivseks pooleks on kõrge maksumus, kuna tahtes paigaldada 3 andurjaama tuleb tasuda kuni 1800 eurot.

## 2. NÕUDED VALMIVALE SÜSTEEMILE

Süsteemi projekteerimisel tuleb aru saada lahendatava probleemi olemusest ja miks seda lahendada tahetakse. Selleks on hea teada vastuseid järgmistele küsimustele:

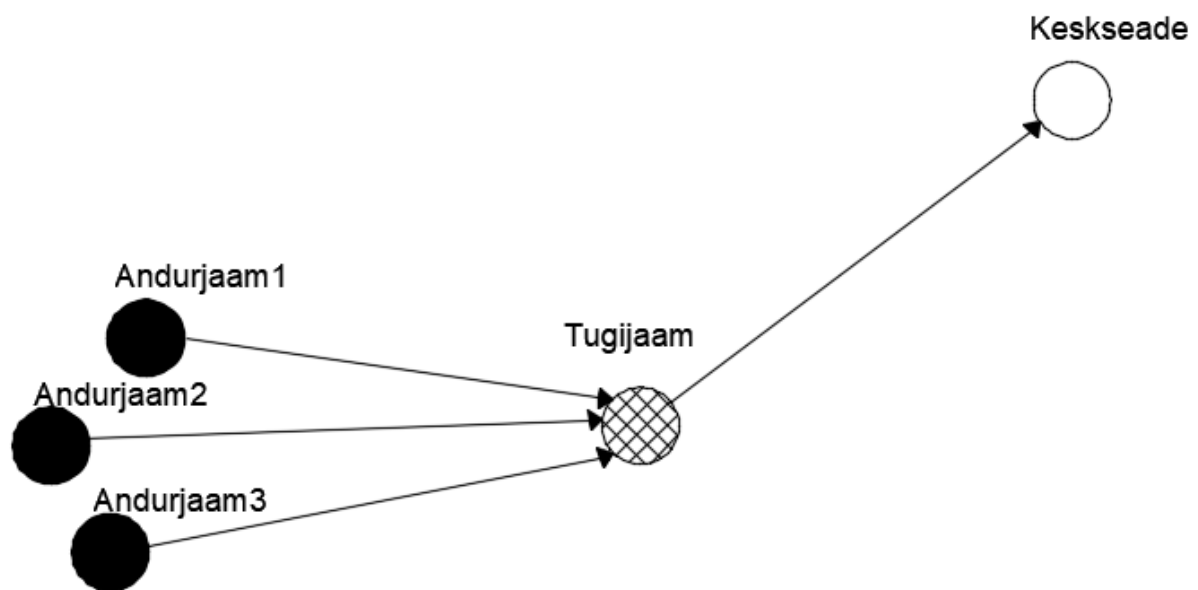
- Süsteemi kontseptsioon- Juhtmevaba mulla olekuparameetrite andmehõivesüsteem, mille kogutuid andmeid saab jälgida reaajas.
- Kes kasutab? - Andmehõivesüsteemi loomise idee tuli maasikataimede kasvatajalt, kuigi selle süsteemi kasutajaks võiks olla ükskõik millise põllukultuuri kasvataja, kes tahab tõsta saagikust läbi pinnase temperatuuri, niiskuse ja õhuniiskuse jälgimise.
- Miks kasutab? - Kogutud andmete põhjal on võimalik muuta näiteks taimede kastmissüsteem efektiivsemaks. Peamiseks eesmärgiks oleks oma põllukultuuri saagikuse tõstmine.
- Kus kasutatakse? - Kasutatakse välitingimustes või kasvuhoonetes. Sellest tulenevalt tuleb andurjaam kujundada võimalikult ilmastikukindlana, et seade suudaks erinevatele keskkonnaoludele vastu pidada. Andmete kogumine toimub suurelt maa-alalt, seetõttu on mõistlik lahendada süsteem juhtmevabalt. See omakorda tähendab, et valmistatav andurjaam peab töötama ilma stabiilse toitevõrguta ehk süsteem tuleks ehitada patareitoitele. Toiteallikas peaks vastu pidama vähemalt ühe vegetatsiooniperioodi, mis on Eesti oludes 190-200 päeva[18].
- Millal kasutatakse? – Süsteemi kasutatakse ööpäevaringselt kevadest sügiseni. Talvekuudel seadmed eemaldatakse maa-alalt.
- Kuidas kasutatakse? – Süsteemi jälgimiseks on olemas keskseadmes graafiline kasutajaliides, millest saab reaajas jälgida mõõdetavaid parameetreid. Samuti kõik andmed salvestatakse, et saaks vajaduse korral andmeid hiljem analüüsida.

Eelnevatele vastustele tuginedes valmistati lähteülesande probleemide plokk skeem (joonis 2.1), mis kirjeldab ära olulisemad etapid, mis tuleb läbida süsteemi projekteerimisel selleks, et valmiks terviklik süsteem.



**Joonis 2.1** Lähteülesannete probleemide plokk skeem

Valmistatava andmehõivesüsteemi juhtmevabas suhtluses kasutatakse puutopoloogiat. Magistritöö raames loodava andmehõivesüsteemi lihtsustatud topoloogia skeem on näha joonisel 2.2.



**Joonis 2.2.** Andmehõivesüsteemi võrgu topoloogia

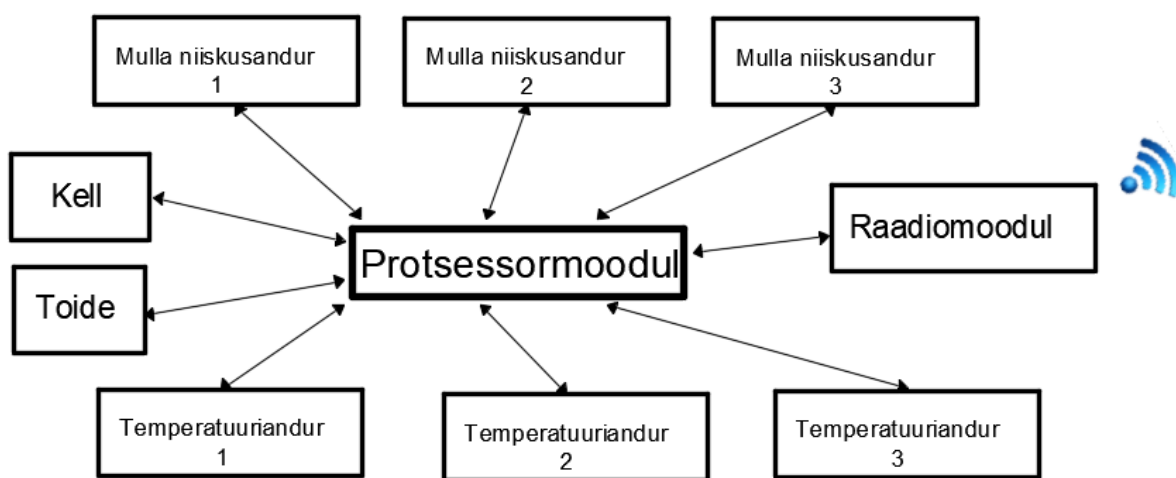
Süsteemi projekteerimisel tuleb samuti silmas pidada kõiki Eesti Vabariigis kehtivaid seadusi.



### 3. ANDURJAAMA KUJUNDAMINE

#### 3.1. Andurjaama struktuur

Projekteeritava andurjaama peamine ülesanne on koguda ümbritsevat keskkonnast andmeid ja need edastada tugijaama. Andurjaama plaadi põhikomponendid on esitatud joonisel 3.1.



**Joonis 3.1.** Andurjaama põhikomponendid

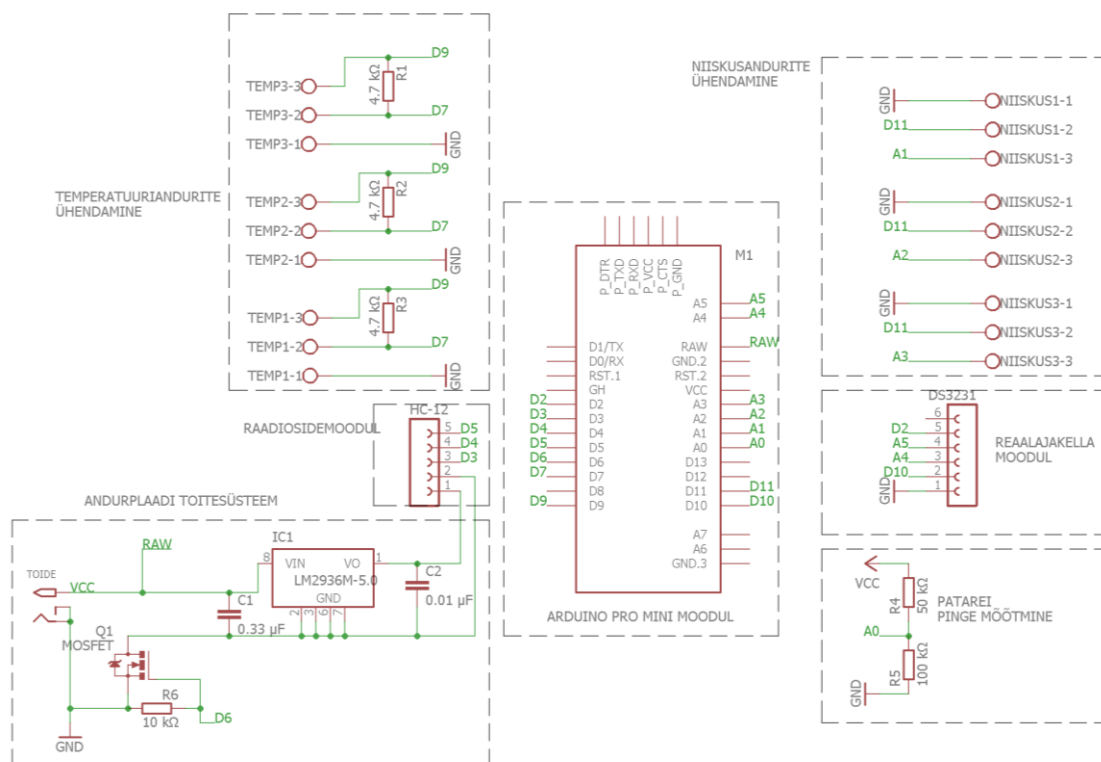
Vastavalt kirjandusallikale [5] on taime efektiivseks kasvatamiseks eelkõige olulised ümbritseva õhu niiskus, temperatuur ja pinnase niiskus ja temperatuur. Õhu niiskus ei erine jälgitaval maa-alal erinevates punktides suurel määral, siis võib seda mõõta ainult ühes punktis (projektis tegeleb sellega tugijaam). Sellest tulenevalt andurjaamad mõõdavad pinnase niiskust ja temperatuure.

Vastavalt kirjandusallikale [19] tuleb mulla niiskust jälgida olenevalt taimekultuurist kahelt või kolmelt eri sügavusel. Sellele infole tuginedes projekteeritakse andurjaama plaadile kolme mulla niiskusanduri paigaldamise võimalus. Temperatuuri tuleks jälgida peamiselt pinnases ja ümbritsevas keskkonna. Näiteks maasikakasvatamisel oleks veel vajadus jälgida kile alust temperatuuri. Andurjaama plaadile projekteeritakse kolme temperatuurianduri kinnitamise võimalus.

Andurjaamade andmete peab edastama raadiosidemooduli abil, kuna jälgitav maa-ala on piisavalt suur ja juhtmete vedamine andurite vahel läheks keeruliseks ja kulukaks.

Vaadeldavale mõõtesüsteemile parima raadiomooduli leidmiseks tehti erinevaid katseid, mida on kirjeldatud alampunktis „Raadiomooduli valimine“.

Andurjaama moodulite ühendamiseks kujundati autori poolt montaažiplaat, mille elektriline skeem on näha joonisel 3.2.



**Joonis 3.2.** Andurjaama plaadi elektriskeem

Jooniselt 3.2 on näha, et andurjaama plaadile on ühendatud Arduino Pro Mini moodul. Nimetatud moodulil olev mikroprotsessor juhib kõikide teiste komponentide tööd. Andurjaama plaadi võib eelneva teksti põhjal jagada mõtteliselt seitsmeks alamosaks:

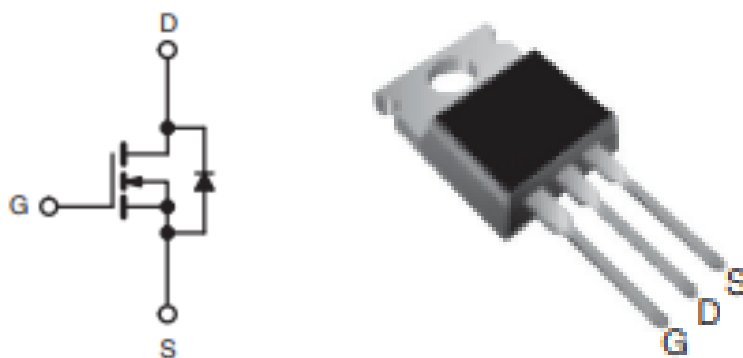
1. Toitesüsteem;
2. Arduino Pro Mini moodul;
3. Reaalajakell DS3231 AT24C32;
4. Niiskusandurite ühenduskohad;
5. Temperatuuriandurite ühenduskohad.
6. Patarei pingemõõtmine;
7. HC-12 raadiomoodul;

Kõiki andurjaama plaadi osasid ja tööpõhimõtteid on kirjeldatud järgmistes töö alajaotistes täpsemalt.

### 3.2. Toitesüsteem

Toitesüsteemil (vaata joonist 3.2) on kaks peamist eesmärki. Esiteks peab toitesüsteem ära varustama elektrienergiaga Arduino Pro Mini moodul ja teiseks tuleb varustada energiaga raadiosidemoodul. Raadiosidemoodul HC-12 tarbib voolu andmete saatmise hetkel ligikaudu 100 mA [20]. Pro Mini ühe viigu maksimaalne lubatav koormusvool on ainult 40 mA, seepärast ühendatakse moodul HC-12 pingallikaga otse[21]. Kuna HC-12 tööpinge on 5 V ja toitemooduli pinge on 7,2 V, siis on vaja kasutada pingeregulaatori abi. Käesolevas töös kasutatakse pingeregulaatorit LM78L05ACMX. Regulaatorile võib sisendpingeks olla kuni 30 V ja väljundpingeks on vajalikud 5 V[22]. Arduino Pro Mini toidetakse läbi viikude RAW ja GND. Ühendades toiteallika pluss klemmi viigu RAW külge tohib kasutada 3,3-12 V pingega toiteallikat, kuna Arduino Pro Mini moodul sisaldab 3,3 V väljundpingega sisseehitatud pingeregulaatorit [20].

Pingeregulaator ja raadiosidemoodul HC-12 tarbivad energiat ka hetkel, kui andmeid ei edastata. Energia kokkuhoiu eesmärgil tuleks nende toitering katkestada andmete mitteedastamise perioodil. Toiteringi katkestamiseks kasutatakse isoleeritud paisuga väljatransistorit MOSFET IRL540n lülitina. Transistori üheks oluliseks parameetrik on pingetaluvus, mis näitab millise maksimaalse pinget korral tootja garanteerib transistori tööd. Toitemooduli pinget on maksimaalselt 7,2 V, seda peab transistor taluma paisu ja läte vahel (joonis 3,3). Ületades etteantud pinget piiri võib transistor küll edasi töötada, kuid tulemus võib olla ettearvamatu. Valitud transistor talub paisu ja läte vahel 100 V [23].

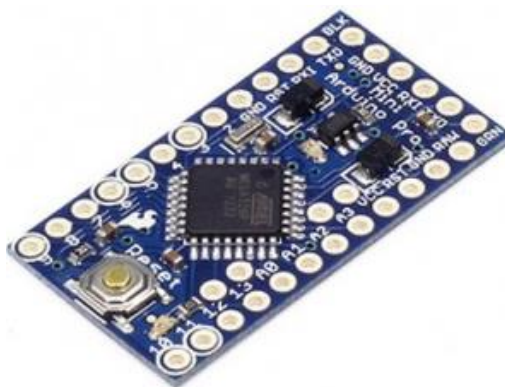


**Joonis 3.3.** MOSFET IRL540n transistori sisendid ja väljundid, G – värav, S – läte, D – pais [23]

Tähtsaks kriteeriumiks on veel pinge värava ja lätte vahel  $V_{GS}$ , mis avab transistori täielikult. Valitud transistori IRL540n MOSFETil on selleks väärtuseks 1-2 V[23]. Mikrokontrolleri väljundis tekkiv pinge 3,3 V rakendub transistori värava ja lätte vahele. Selle tulemusena transistor avaneb täielikult ja transistori takistus on minimaalne vältimaks IRL540n ülekuumenemist.

### 3.3. Arduino Uno Pro Mini moodul

Andurjaama valmistamiseks valiti vaadeldavas magistrisööses Arduino Uno Pro Mini moodul (joonis 3.4). See moodul on eelkõige mõeldud projektidele, kus on oluline kompaktsus, nagu ka vaadeldava projekti korral. Moodul on saadaval kahe erineva versioonina. Üks töötab pingega 5 V ja töötaktisagedusega 18 MHz, teine töötab pingega 3,3 V ja töötaktisagedusega 8 MHz [21]. Valitud on 3,3 V tööpingega versioon, mis on 5 V tööpingega versioonist energiasäästlikum.



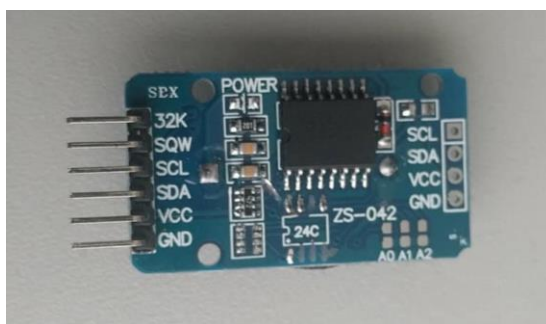
**Joonis 3.4.** Arduino Pro Mini moodul [21]

Arduino Pro Mini töötab mikrokontrolleriga ATmega328P, millel on 14 digitaalsisend/väljundit ja kuus analoog-sisend/-väljundit[21]. Valmistatava andurjaama loomiseks piisab nendest digitaal- ja analoogsisenditest/väljunditest. Mikroprotsessoril on väälmälu 32 KB, mis talletab alglaadimise programmi (*bootloader*) ja samuti kasutaja pool pealelaaditud programmi. [21]

### 3.4. Reaalaja kellamoodul DS3231 AT24C32

Reaalajakell on elektroonilistes seadmetes kasutatav aja arvestamisega tegelev lülitis. Reaalajakella peamine ülesanne on olla sõltumatu ja täpne ajainfo allikas. Sõltumatult tähendab siinkohal, et reaalajakell suudab säilitada ajaarvestuse üldise vooluringi katkemisel. See on tagatud tänu patareile, mis on eraldiseisev seadme üldisest vooluringist.[24]

Kellamoodul DS3231 AT24C32 (joonis 3.5) sisaldab reaalajakella DS3231 ja EEPROM mälu AT24C32 mahuga 32 KB. Mälu saab kasutada andmete hoiustamiseks. [24]



**Joonis 3.5.** Reaalaja kellamoodul DS3231 AT24C32

Reaalajakell DS3231 valiti põhjusel, et tal on olemas alarmi funktsioon. Alarme on võimalik programmeerida vastavalt kasutaja vajadusele, alates ühe sekundi pikkusest intervallist kuni mitme aastani [24]. Andurjaamas on kasutatud seda funktsiooni, et äratada mikroprotsessor unerežiimist. Põhjus miks otsustati valida valmis reaalajakella moodul, mitte selle aluseks olev mikrolülitis on selles, et tagada kvaliteetne ühendus mikrolülituse jalgadega. Mikrolülituse kasutamise puhul oleks autor pidanud jootma arendusplaadile käsitsi väikese viikudesammuga mikrolülituse. Autor ei suuda tagada sellise jooteühenduse kvaliteeti. Samuti kui valida mikrolülitis, tuleks reaalkella toite jaoks ikkagi muretseda patareihooldik ja see ühendada mikrolülitusega ja kokkuvõttes ei tuleks tulemus kompaktsem. Autori eesmärk on hoida andurjaama ehitus võimalikult lihtne ja seeläbi töökindel.

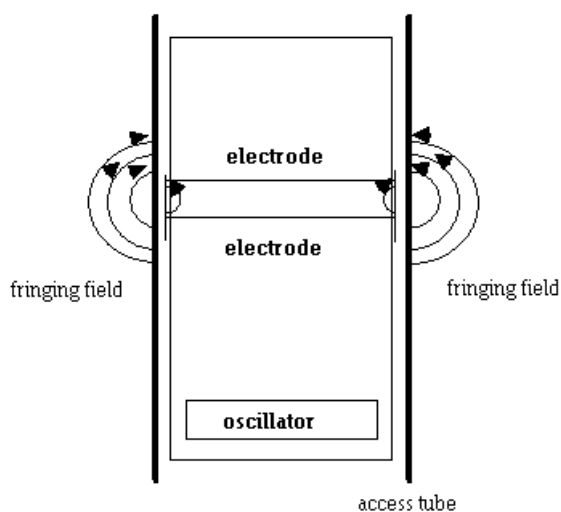
### 3.5. Mullaniiskuse andurite ühendamine

Andurjaama plaadile peab looma kohad, kuhu on võimalik ühendada mullaniiskuse andurid. Stabiilselt pole andureid mõtet andurjaama plaadile kinnitada, kuna andur asetseb andurjaama korpusest väljaspool ja neid on vaja aegajalt välja vahetada, et tagada mõõtesüsteemi täpsus. Vaadeldavas magistritöös kasutatakse andurit SEN0193 (joonis 3.6). Andur töötab pingega 3,3 V kuni 5 V ja ühendatakse andurjaama plaadiga kruviklemmidega[25].



**Joonis 3.6.** Mulla niiskusandur SEN0193

Mahtuvuslik andur on kondensaator (joonis 3.7), mille mahtuvus sõltub pinnase veesisaldustest. Mulla suhteline dielektriline läbitavus mõjutab kõige enam vee hulk mullas, kuna vee dielektriline läbitavus ( $\epsilon = 80$ ) on palju suurem kui teiste muldade koostisosade, nagu mineraalmuld ( $\epsilon = 4$ ), orgaaniline aine ( $\epsilon = 4$ ) ja õhk ( $\epsilon = 1$ ), dielektrilised läbitavused.[26]



**Joonis 3.7.** Mahtuvusliku mulla niiskusanduri põhimõte [27]

Anduril SEN0193 on kolm ühendusviiku VCC, GND ja AOUT. VCC ja GND on toiteviigud ja AOUT edastab mikroprotsessorile analoog signaali, mille väärtuse teisendab programm vee sisalduseks mulla kogumahust (%). Tahtes usaldusväärseid tulemusi tuleb andurid kalibreerida. Selleks kuivatati mulda kuni eeldatavasti kogu niiskus sellest oli lahkunud. Eeldati, et see muld vastab niiskustasemele 0%. Anduriga tehti mõõtmine ja märgiti ülesse analoogväljundi suurus. Edaspidi hakati lisama kuivale mullale vett. Vee sisaldust mullas tõsteti 20% kaupa. Vajaminev veekogus leiti kuiva mulla massi suhtes valemiga:

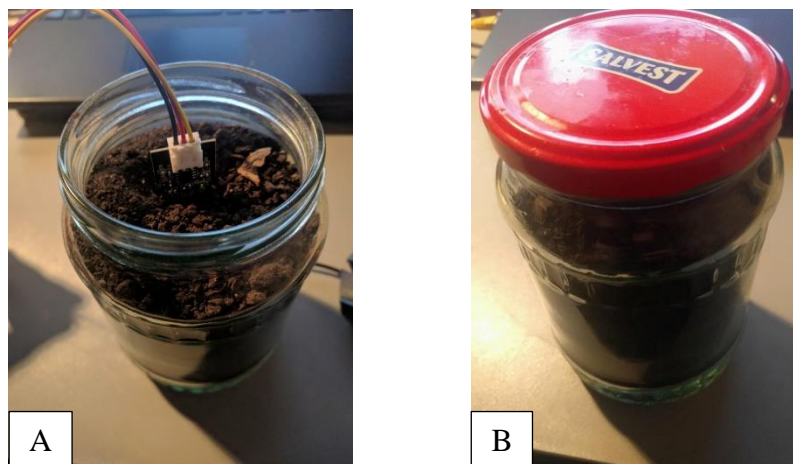
$$N = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100, \quad (3.1)$$

kus  $N$  on pinnase niiskus %;  
 $m_1$  – märja pinnase mass kg;  
 $m_2$  – kuiva pinnase mass kg.

Kuiva mulla mass millega katset alustati oli 0,234 kg. Tahtes saavutada mulla niiskust 20% peab märja mulla mass olema:

$$m_1 = m_2 \cdot \left( \frac{N}{100} + 1 \right) = 0,234 \cdot \left( \frac{20}{100} + 1 \right) = 0,2808 \text{ kg}$$

Lihtsa tehete saame teada, et esimesel korral on kuivale mullale vaja lisada 46,8 g vett. Parema tulemuse saamiseks peale vee lisamist sulgetakse tugevalt purgi kaas, et vältida vee aurumist. Purk jäetakse peale igat vee lisamist 2-3 tunniks seisma, et niiskustase mullas ühtlustuks. Katse tulemus on näha joonisel 3.8.



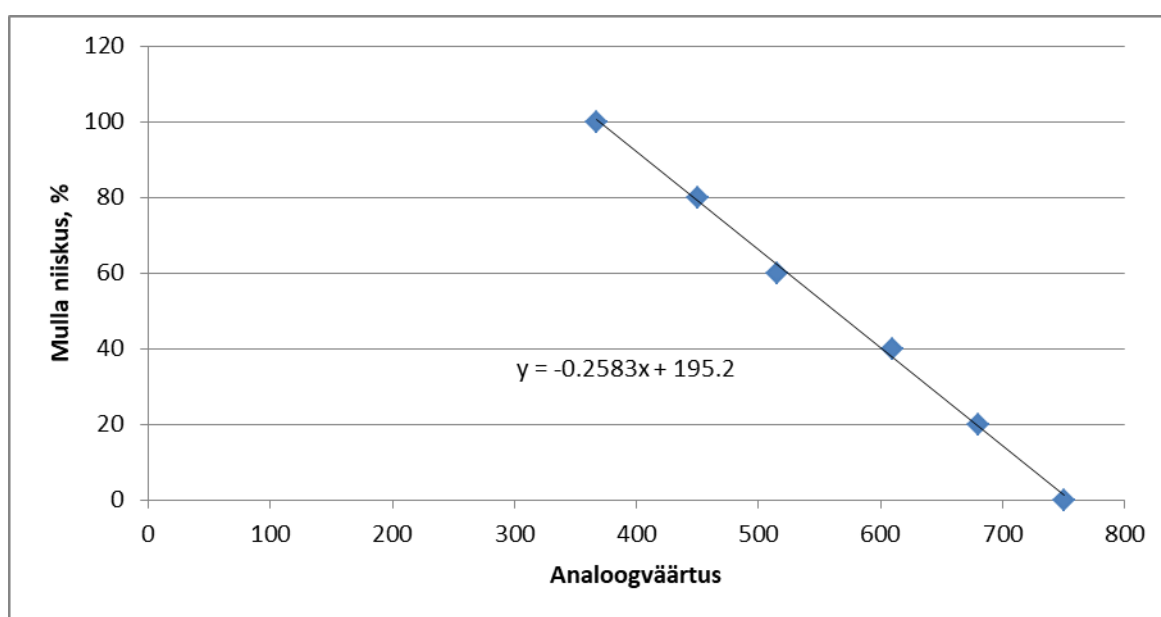
**Joonis 3.8.** Mulla niiskusandurite kalibreerimine: A-niiskuse mõõtmine, B-mullale on lisatud vesi.

Anduri katse tulemused on esitatud tabelis 3.1.

**Tabel 3.1.** Anduri SEN0193 katse tulemused

Mulla niiskus, %	Vee mass kogu massist, g	Analoogväljundi suurus
0	-	751
20	46,8	680
40	93,6	610
60	140,4	515
80	187,2	450
100	(puhas vesi)	367

Nende andmete põhjal saab genereerida anduri kalibreerimiskõvera, mis on esitatud joonisel 3.9.



**Joonis 3.9.** Anduri SEN0193 kalibreerimiskõver

Saadud valem kirjutatakse programmi ja selle abil teisendatakse analoogväärtused mulla niiskuseks.

Programmikoodiga määratakse ära samuti anduri toiteviik. Nimelt andurit toidetakse läbi digitaalviigu ja see on sisse lülitatud ainult sellel juhul kui mikroprotsessor on ärkvel ja programm töötab. Suurema osa ajast mikroprotsessor on unerežiimis ja anduril toide puudub.



### 3.6. Temperatuuriandurite ühendamine

Andurjaama plaadiga on vaja ühendada ka temperatuuriandurid. Selleks kasutatakse kruviklemmisid. Sellisel juhul on võimalik valida mitut andurit tahetakse andurjaama külge ühendada. Käesolevas magistritöös kasutatakse digitaalset temperatuuriandurit DS18B20. Igal DS18B20 temperatuurianduril on oma unikaalne 64-bitine kood, tänu millele saab ühe mikroprotsessori viigu külge ühendada mitut digitaalset temperatuuriandurit[28]. Temperatuurianduritel DS18B20 on mõõtevahemik  $-55...125\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja mõõtetäpsus  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatuuride vahemikus  $-10...85\text{ }^{\circ}\text{C}$ [28]. Anduril on kolm viiku GND, VCC ja DOUT. Turult on võimalik leida andurit DS18B20 ka veekindla ümbrisega, mida on näha joonisel 3.10.



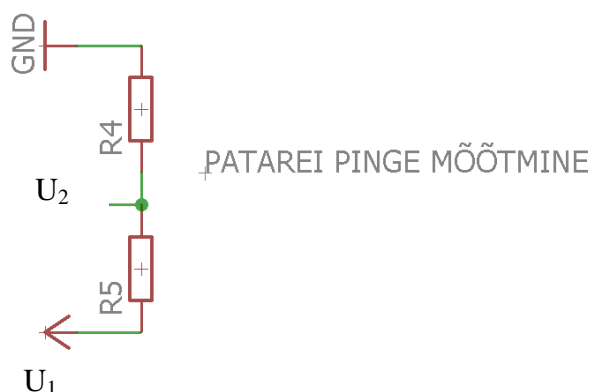
**Joonis 3.10.** DS18B20 temperatuuriandur veekindlas korpuses

Selline konstruktsioon tagab, et anduriga on võimalik temperatuuri mõõta välistingimustes. Toide temperatuurianduritele tuleb läbi Arduino Pro Mini digitaalväljundi, mis lülitub sisse ainult mõõtmise sooritamise hetkeks.

### 3.7. Patarei pinge mõõtmine

Raske on määrata täpset patarei tööiga arvutuslikult. Andurjaama toitva patarei tühjenemisel tekib hetk kunas klemmipinget ei ole enam vajalikult väärtusel ja seetõttu andurjaama töö katkeb. Andmehõivesüsteemi kasutaja informeerimiseks patarei tühjenemisest on andurjaama plaadile projekteeritud pingejagur, mille abil on andurjaam suuteline mõõtma patarei pinget ja raadiosidemooduli abil edastama selle tugijaamale. Pingejagur ise on lihtne elektriabel, mille väljundpinge moodustab osa sisendpingest [29].

Väljundpinge suurus sõltub elektriahela moodustavate takistite takistuste suhtest. Joonisel 3.11 on näha andurjaama elektriskeemi pingejaguri osa.



**Joonis 3.11.** Andurjaama patarei pinge mõõtmise skeem

Skeemi väljundpinge on arvutatav järgmise valemiga [29]:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_4}{R_5 + R_4}, \quad (3.2)$$

kus  $U_1$  on sisendpinge V;  
 $U_2$  – väljundpinge, V;  
 $R_4$  – neljas takisti  $\Omega$ ;  
 $R_5$  – viies takisti  $\Omega$ .

Väärtus loetakse läbi analoogsisendi. Arduino Pro Mini analoog-digitaal muunduri resolutsioon on 10 bitti (mitme erineva väärtuse vahel saab ADC muundur valida signaali väärtuse) ehk muundur saab jagada signaali  $2^{10}$  osaks (1024). Teada on, et toitemooduli pinge on 7,2 V. See tähendab, et maksimaalne pinge väärtus, mida analoogsisend teoreetiliselt võiks suuta mõõta on ligikaudselt 9 V. Kuna mikroprotsessori analoogviik ei talu 9 V pinget on vaja pingejagurit, mis vähendab maksimaalse pinge suurust vähemalt 3,3 V-ni. Pingejaguri takistiks  $R_4$  valitakse 50 k $\Omega$  takisti (mõõdetud väärtus 49,3 k $\Omega$ ) ja takistiks  $R_5$  valitakse 100 k $\Omega$  takisti (mõõdetud väärtus 99,2 k $\Omega$ ). Kui sisendpingeks on 9 V siis väljundpinge on:

$$U_2 = 9 \cdot \frac{49,3}{49,3 + 99,2} = 2,98 \text{ V}$$

Kuna Pro Mini analoogsisend kannatab 3,3 V siis  $U_2$  väärtus 2,98 V on maksimaalseks pingeks sobilik.  $U_2$  väärtus juhul kui sisendpingeks on 5 V (kui sisendpinge alla 5 V siis

raadiosidemooduli töö on häiritud ja toitemoodul tuleks välja vahetada) on 1,65 V. Need pinge väärtused teisendab ADC digitaalseks väärtusteks, mida saab juhtprogrammi abil teisendada tagasi toiteallika pinge väärtuseks ja raadiosidemooduli kaudu saata see info keskseadmesse.

### **3.8. Raadiomooduli valik**

#### **3.8.1. Valiku põhimõtted**

Juhtmevaba andurivõrgu kujundamise juures on üheks olulisemaks osaks raadiosidemooduli valik. Vaadeldavas magistritöös võrreldakse erinevaid taskukohaseid raadiosidemooduleid. Võrdlusmomendi tekitamiseks on esitatud moodulite põhiparameetrid tabelis ja sooritatud kaks katset. Esimese katse eesmärk oli testida moodulite levikaugust ja teise eesmärk hinnata signaali tugevust. Ligikaudne mooduli levikaugus on esitatud moodulite andmelehtedel, kuid see ei vasta tavaliselt reaalsele olukorrale. Olukorrale vastava levikauguse teadasaamiseks on vaja sooritada levikauguse katse. Võrreldud on omavahel viite järgnevat raadioside moodulit:

- Raadiosidemoodul E07-M1101D-TH;
- Raadiosidemoodul NRF24L01+PA+LNA;
- Raadiosidemoodul LoRa DRF1278F;
- Raadiosidemoodul HC-12;
- MX-FS-03Vsaatja ja MX-05V vastuvõtja komplekt.

Raadiosidemoodulite valimiskriteeriumid on järgmised:

- Kasutusmugavus (autori endapoolne hinnang);
- Levikaugus;
- Toitepinge;
- Töötemperatuur;
- Töövool;
- Energia kokkuhoiu režiimid olemasolu;
- Töösagedused;
- Signaali võimsus;
- Signaali kvaliteet.

Raadioside loomisel tuleb arvestada ka Eesti Vabariigi seaduste ja määrustega. Vaadeldavas magistritöö raames ehitatav süsteem kuulub vastavalt määrusele „Raadiosageduste kasutamise tingimused ja tehnilised nõuded sagedusloast vabastatud raadioseadmetele“ mittespetsiifilise lähitoimeseadme alla. Mittespetsiifiline

lähitoimesead on telemeetria-, kaugjuhtimis-, valvesignalisatsiooni, andmeedastus- ja muu samalaadne seade. Viidatud määruses kehtestatakse raadiosageduste sagedusloata kasutamise tingimused ja tehnilised nõuded kooskõlas raadiosageduste kasutamise eesmärkidega, et vältida raadiohäireid ning tagada seadmete koostoime ja avalikkuse kaitse elektromagnetväljade kahjuliku toime eest.[30]

Samast määrusest on ülesse märgitud erinevad raadiosagedusalad ja nendel lubatud suurimad tehnilised näitajad ja kasutamistingimused. Tabelis 3.2 on välja toodud vaadeldavas magistritöö raames testitavate raadiosidemoodulite raadiosagedusalade lubatud tehnilised näitajad.

**Tabel 3.2.** Raadiosagedusalad ja nendel lubatud suurimad tehnilised näitajad ja kasutustingimused[30]

Raadiosagedusala	Kasutustingimused
433,050–434,790 MHz	e.r.p. 10 mW, töötsükkel 10%
433,050–434,790 MHz	e.r.p. 1 mW, lairiba kanalites võimsustihedus -13 dBm/10 kHz, töötsükli piirangud puuduvad
433,050–434,790 MHz	e.r.p. 10 mW, maksimaalne kanalisamm 25 kHz, töötsükli piirangud puuduvad
2400,0–2483,5 MHz	e.i.r.p. 10 mW

Märkused:

1. e.r.p- efektiivne kiirgusvõimsus (*effective radiated power*) on antenni sisendisse antava võimsuse korrutis antenni võimendusteguriga poollaine dipoolantenni suhtes antud suunas;
2. e.i.r.p- ekvivalentne isotroopne kiirgusvõimsus (*equivalent isotropically radiated power*) on antenni sisendisse antava võimsuse korrutis antenni absoluutse võimendusega antud suunas.

Tabelis 3.2 märgitud nõudmisi peab järgima kui tahta ilma raadiosageduste sagedusloata hoida oma süsteemi töös. Kuna vaadeldava süsteem töötsükkel ei ole üle 10%, kuna andmeid loetakse harva, siis peab lihtsalt jälgima, et kiirgusvõimsus ei ületaks määruses lubatud.

### 3.8.2. Katsete kirjeldus

Seadmetevaheline maksimaalne kaugus sõltub nende ehituse osaks olevate raadiojaamamoodulite tööraadiusest. Sõltuvalt lainepikkusest, antenni tundlikkusest, saatevõimsusest, riistvaralisest ja tarkvaralisest konfiguratsioonist lähtuvalt on raadiomoodulite tööraadius erinev. Levikauguse katsetamiseks kasutati moodulite paari, kus üks moodul oli vastuvõtja (*receiver*) ja teine saatja (*transmitter*). Katse jaoks ühendati saatja Arduino Pro Miniga, sest seda sama moodulit kasutatakse juhtmevabade andurseadete valmistamiseks. Teine moodul ehk vastuvõtja ühendati Arduino Uno

arendusplaadiga. Kuna iga mooduli programmeerimine/seadistamine on erinev, siis loodi magistritöö raames igaühele eraldiseisev testprogramm Arduino IDE keskkonnas.

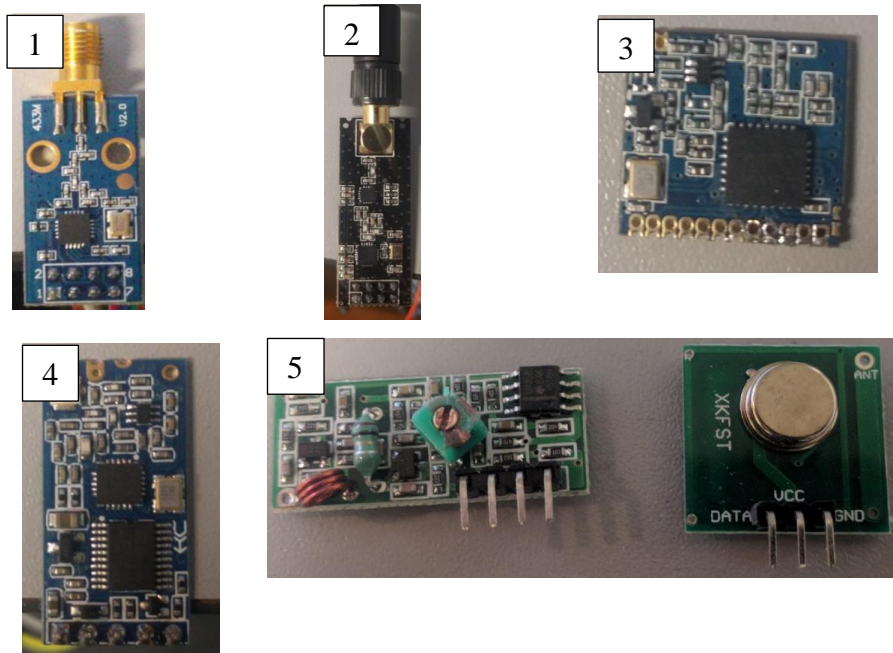
Iga testprogrammi tööpõhimõte on sarnane. Kaks moodulit pannakse üksteisega suhtlema, kui andmeside toimub süttib roheline LED, aga kui andmeside katkeb/puudub süttib punane LED. Andmeteks on valitud suvaliselt genereeritud arv. Tahtes olla veendunud, et saadetud info jõuaks ka täies mahus vastuvõtjani on programm valmistatud nii, et roheline LED süttib ainult sel juhul kui vastuvõtjani jõudnud arv ühtib saadetud arvuga. Katsetamiseks asetatakse üks saatja 1,5 m kõrguse puki otsa ja liigutakse sirgjoones saatjast eemale. Samal ajal jälgitakse vastuvõtja valgussignaale (punane ja roheline LED). Kui enam ei suudeta andmesidet kahe mooduli vahel saavutada, siis liigutakse tagasi viimasesse punkti, kus seda suudeti. Seejärel märgitakse ülesse saatja ja vastuvõtja vaheline kaugus ja eeldatakse, et see on hetkeoludes maksimaalne saavutatav mooduli levikaugus. Tulemused esitatakse alapunktis „Katsete tulemused ja mooduli valik“.

Teises katses mõõdetakse kahe raadiomooduli vahelise ühenduse pakettide kadusid. Kahe seadme vahelist distantssi saab suurendada seni, kuni andmesidepakettide vahetuses hakkavad esinema märkimisväärsed paketikaod. Paketikaoks katses loetakse olukorda, kui vastuvõtja ei saa saatja poolt saadetud paketti kätte ettenähtud aja jooksul või kättesaadud info pole täielik. Pakettide kadudest saab arvutada signaali kvaliteedi protsentides. Paketikadusid mõõdetakse olukorras, kus saatja ja vastuvõtja vahele ei jää ühtki suurt takistust. Katse tulemused on esitatud alajaotises „Katsete tulemused ja mooduli valik“.

Katsed viidi läbi Viljandimaal, Leie külas. Autor tahtis katsed läbi viia maapiirkonnas, kuna seal pole niipalju segavaid signaale kui linnas. Kirjeldatav süsteem töötab tulevikus maal, siis seepärast selline otsus ka vastu võeti. Samuti on maapiirkonnas lihtsam leida piirkond, kus pole ühtki tehislukku takistust.

### **3.8.3. Katsetavad raadiomoodulid**

Järgneval joonisel 3.12 on välja toodud viis katsealust moodulit, mida magistritöö raames katsetati.



**Joonis 3.12.** Katsealused raadioside moodulid: 1 - E07-M1101D-TH; 2 - NRF24L01+PA+LNA; 3 - LoRa DRF1278F; 4 - HC-12; 5 - MX-FS-03Vsaatja ja MX-05V vastuvõtja komplekt

Nende viie moodulite hulgast valiti käesolevasse magistritöösse üks raadiomoodul, millega luuakse juhtmevaba andurvõrk.

Raadiosaatja CC1101 (joonis 3.12(1)) on mõeldud väikese võimsusega juhtmevabade rakenduste jaoks. Moodul on peamiselt mõeldud töötama tööstuslike, teaduslike ja meditsiinilistel sagedusribadel, milleks on 325, 433, 868 ja 915 MHz, kuid moodulit on võimalik programmeerida sagedustele 300-348 MHz, 387-464 MHz ja 779-928 MHz. [31] Katse viiakse läbi mooduliga E07-M1101D-TH, mis kasutab just raadiosaatjat CC1101, mille sagedus on 433 MHz. Maksimaalne saatevõimsus on moodulil 10 mW. Mooduli külge on võimalik ühendada SMA antenn.

Suhtlus mikrokontrolleri ja mooduli vahel käib suhtluskanali SPI (*Serial Peripheral Interface*) abil. SPI on järjestiksiin, mida kasutatakse mikrokontrolleri suhtlemisel välisseadmetega. Seda tüüpi ühendustes on alati üks põhiseade (*master*), mis kontrollib ühte või mitut välisseadet (*slaves*). Kontrolleriga ühenduseks kasutatakse tavaliselt viit infoviiku. Lisaks ka toiteviigud. Kindlalt peavad kontrolleriga ühenduses olema viigud SCK (*Serial Clock*), mis määrab suhtlemise töösageduse, MISO (*Master in Slave out*) ehk juhtseadmesse info sisse, alamseadmest välja, MOSI (*Master out Slave in*) ehk kontrollerist info välja ja moodulisse sisse ja SS (*slave select*) ehk viik millega lubatakse seadmete vaheline suhtlus. SS viigu olemasolu lubab keskseadmest SPI-kanali kaudu

suhtlust mitme seadmega, kui kasutava seadme MISO, MOSI ja SCK viigud ühendada mikrokontrolleri samadesse viikudesse.[32]

Raadiosaatja NRFL24L01 (joonis 3.12(2)) puhul on tegemist Nordic Semiconductors'i poolt valmistatud 2,4 GHz SPI suhtlusmodelil toimiv madala voolutarbega raadioside mooduliga. Voolutugevus NRF24L01+PA+LNA puhul ei ületa 45 mA. Mooduli operatiivpinge 1,9-3,6 V (keskmine 3,3 V) on igati sobilik madala energiatarbega seadmete ehitamiseks ja samas tagab ühildavuse paljude tänapäeva mikrokontrolleritega. Edaspidi viidatakse käesolevatele moodulitele kui NRF24-moodulile[31]. Lisaks on NRF24-moodulit võimalik seadistada nii, et voolutarve on alla 900 nA.[33]

LoRa DRF1278F mooduli (joonis 3.12(3)) puhul on tegemist 433 MHz töötava SPI suhtluskanalil põhineva raadiosidemooduliga. Sobib väikest levikaugust ja madalat andmeedastuskiirust vajavate projektide jaoks. Kirjeldatavale moodulile pole külge ehitatud SMA antenni otsikut, nagu kahel eelmisel moodulil. Moodulile on võimalik juurde joota vastava takistusega traat, mis aitab signaale paremini püüda. Moodul töötab pingega 1,8-3,6V. Samuti on moodulil olemas väljalülitus režiim, millega saab andurseadme tarbitavat voolutugevust vähendada. Väljalülitus režiimis tarbib moodul ligikaudu 1  $\mu$ A voolu. Andmeedastuse ajal on maksimaalne voolutugevus moodulil 125 mA.[34]

Moodul HC-12 (joonis 3.12(4)) on mõeldud suuremat levikaugust nõudvate projektide jaoks. Moodul töötab sagedusvahemikes 433,4-473,0 MHz. Moodul HC-12 töötab UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) põhimõttel. Sellistel moodulitel on andmeedastuskiirus ja edastatavad andmetüübid seadistatavad. Moodulid saadavad infot bittide kaupa (üks bitt korraga) ja vastuvõtja korjab kõik bittid kokku ja moodustab neist baidid. Mooduli togitepinge on 5 V ja maksimaalne saatevõimsus on 100 mW. Moodulil on neli erinevat saaterežiimi, mis erinevad andmeedastuskiiruse ja energiatarbe poolest. Vaadeldavas katses kasutati saaterežiimi FU4, mis on kaugsuhtluse režiim. Spetsifikatsiooni alusel peaks selles režiimis küündima levikaugus 1800 meetrini.[20]

MX-FS-03V saatja ja MX-05V vastuvõtja komplekt (joonis 3.12(5)) erineb eelnevatest moodulitest selle poolest, et saatja ja vastuvõtjamoodul on välimuselt erinevad (joonis 1.1). Erinevad on ka toitepinged. Vastuvõtja töötab 5 V toitepingel, aga saatja toitepinge võib olla 3,5-12 V [35]. Vastavalt toitepingele on ka saatevõimsus erinev. Moodul töötab

sagedusel 433 MHz ja töötab ASK- ehk amplituudmanipulatsiooniga. Amplituudmanipulatsioon on digitaalmodulatsioon, mille korral kandevõnkumise amplituudid moduleeritakse digitaalset informatsiooni kandva signaaliga[36]. Seda tehakse seetõttu, et kanda sümbolid üle väheste vigadega. ASK on tundlik erinevate mürade ja moonutuste suhtes[36].

Järgnevalt on välja toodud viie mooduli põhiparameetrid ühes tabelis (tabel 3.3.) .

**Tabel 3.3.** Raadioside moodulite põhiparameetrite võrdlus [19,30,32,33,34]

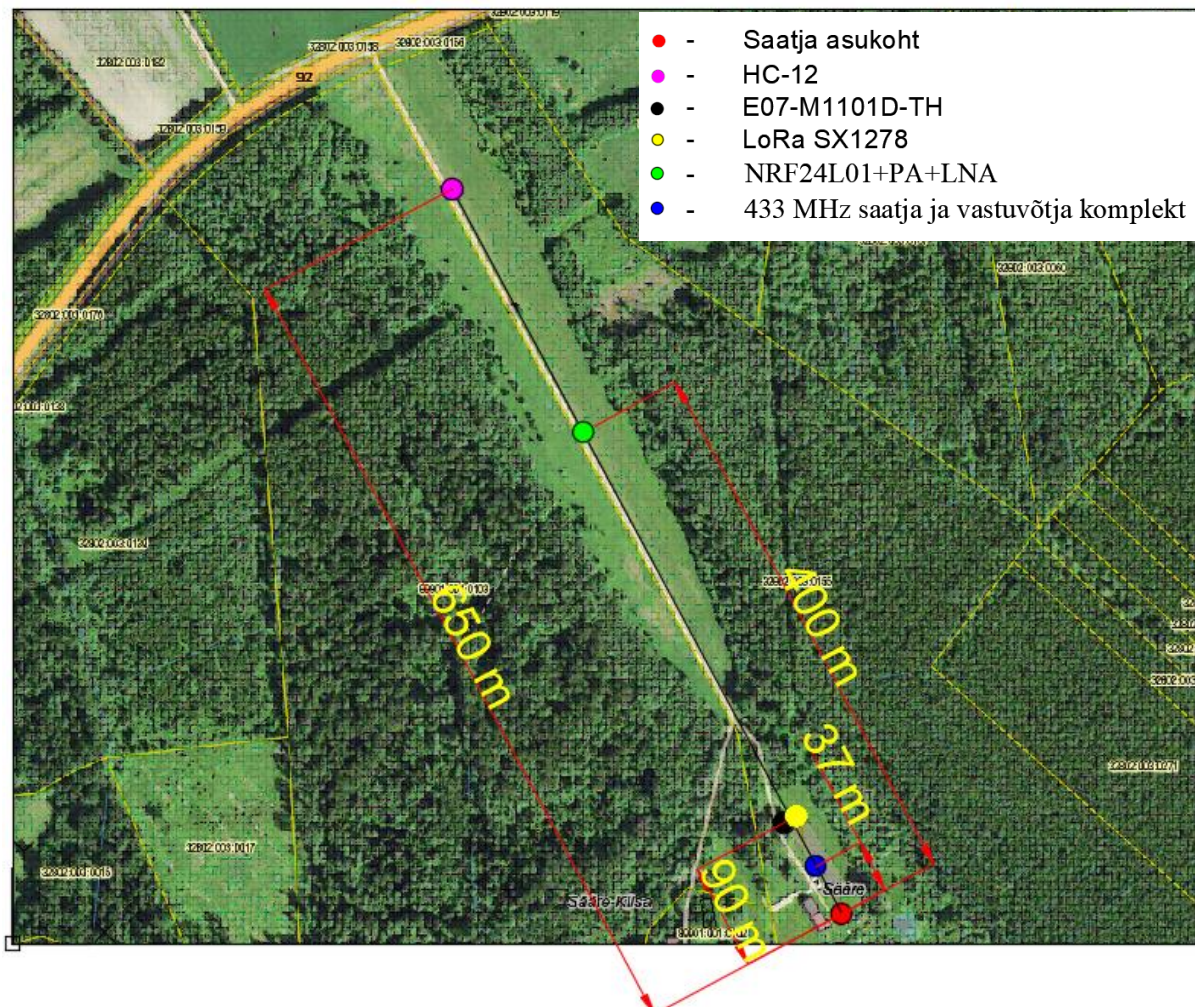
Parameeter	Moodul				
	NRF24L01	HC-12	M1101D	433 MHz komplekt	DXF1278F
Toitepinge	1.9-3.6 V	3.2-5.5V	0.7-3.6 V	3.5-12V	1.8-3.6V
Maks. Töövool	11.3 mA	16 mA	26.9 mA	30 mA	125 mA
Min. töövool	900 nA	22 uA	0.6 mA	4 mA	≤ 1uA
Kasutus temp	-40°C kuni +85°C	-40°C kuni +85°C	-40°C kuni +85°C	-40°C kuni +80°C	-40°C kuni +80°C
Töösagedus	2.4 GHz	433.4-473.0 MHz	387-464 MHz	433.92MHz	433 MHz
Signaali võimsus	18dBm	20dBm	10dBm	10dBm	20 dBm
Vastuvõtja tundlikkus	-82dBm kuni -94dBm	-117dBm to -100dBm	-116dBm	-105dBm	-139dBm
Antenn	SMA	SMA	SMA	Traat	Traat
Kasutusmugavus (Autori poolne hinnang)	5	4	3	5	2

Tabeli 3.3 andmeid võetakse arvesse mooduli lõplikku valiku tegemisel.

#### 3.8.4. Katsete tulemused ja mooduli valik

Raadiomooduli levikauguse testi tulemused on esitatud joonisel 3.13. Tulemustest on näha, et kõige parema levikaugus saavutati HC-12 mooduliga (650 m) ja kõige väiksem MX-FS-03V saatja ja MX-05V vastuvõtja komplektiga (37 m).



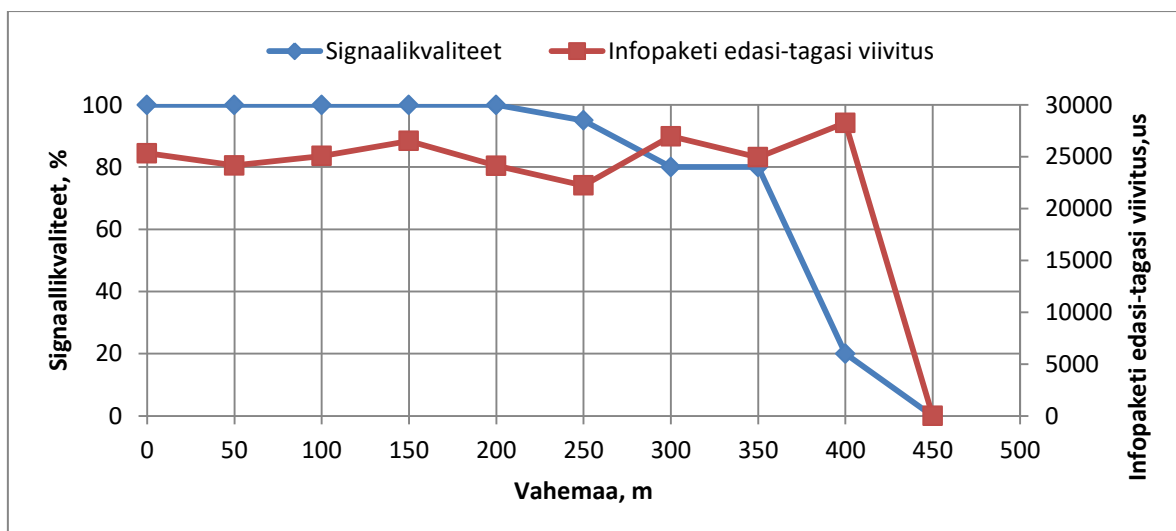


**Joonis 3.13.** Levikauguse katse tulemused

Levikauguste tulemuste kohta peab mainima kindlasti seda, et tegemist on autori enda läbiviidud katsega ja see kirjeldab mooduli levikaugust ainult konkreetses olukorras. Tulemusi mõjutavaid tegureid on erinevaid alates signaali teele jäävatest takistustest lõpetades ilmastikuoludega.

Levikauguse testis osutusid kaheks parimaks NRFL24 ja HC-12 moodul. Kuna ülejäänud kolme mooduli levikaugused on juba tunduvalt väiksemad, siis teise katse korral tegeleti ainult HC-12 ja NRFL24-mooduliga.

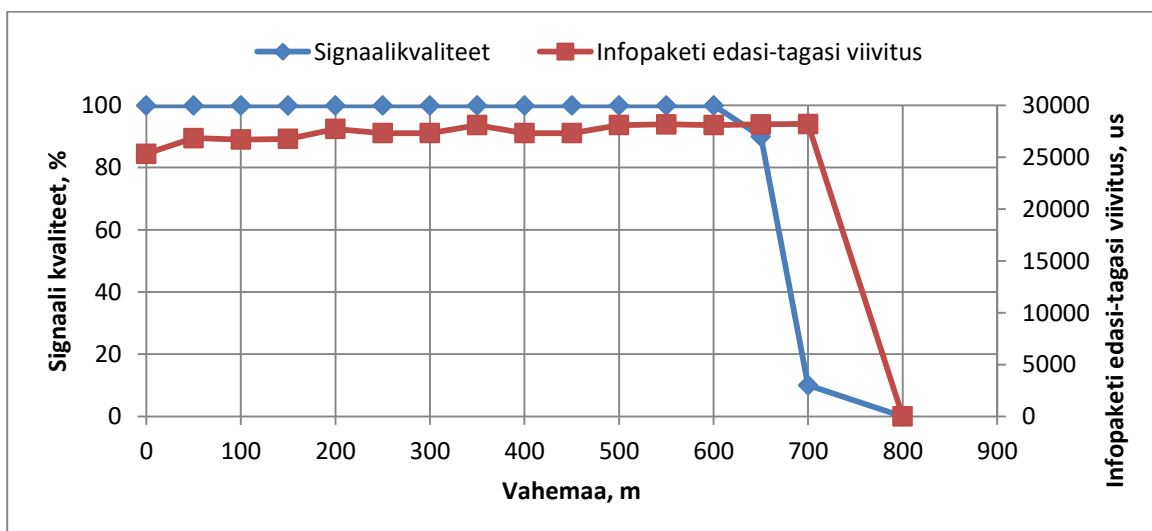
Signaali kvaliteedi määramiseks saadeti igas mõõtepunktis saatja poolt 100 infopaketti ja fikseeriti, mitu paketti jõudis algse info saatjani tagasi. Infopaketi saatmine loetakse ebaõnnestunuks ka juhul, kui tagasi jõudnud infopakett pole täielikult sama, mis saadetud infopakett. Joonisel 3.14 on näidatud NRFL24 signaali kvaliteet ja infopaketi edasi-tagasi saatmise viivitus sõltuvalt saatja ja vastuvõtja vahelisest vahemaast.



**Joonis 3.14.** NRFL24L01 signaalitugevuse sõltuvus saatja ja vastuvõtja vahelisest vahemaast ja infopakettide keskmine edasi-tagasi viivitus.

NRFL24 raadiomooduli puhul hakkas levi vähenema kui seadmete vaheline vahemaa on 250 meetrit. Signaal kadus 450 meetri kaugusel. Kui seadmete vahemaa oli 400 meetrit suudeti moodulite vahel side lühikeseks ajaks luua, aga mitte kauaks. Sajast infopakettist jõudis kohale 10 tükki, mis teeb signaalkvaliteediks 10%. Signaali kvaliteedi ja edasi-tagasi viivituse vahel ei tundu suurt seost olevat.

Joonisel 3.15 on näidatud HC-12 signaali kvaliteet ja infopaketi edasi-tagasi saatmise viivitus sõltuvalt saatja ja vastuvõtja vahelisest vahemaast.



**Joonis 3.15.** HC-12 signaali tugevuse sõltuvus saatja ja vastuvõtja vahelisest vahemaast ja infopakettide keskmine edasi-tagasi viivitus.

HC-12 signaali kvaliteet oli 100% kuni 600 meetrini. Selles katses suudeti nõrk signaal tuvastada 700 meetri kaugusel. Keskmine edasi-tagasi viivitus tõusis ühtlaselt vahemaa suurenedes. Nendest katsetulemustest võib järeldada, et HC-12 raadioside moodulit võiks kasutada tugijaamast 600 meetri kaugusel, sest seal on veel levi kvaliteet 100%.

Magistritöös valitakse raadiosidemooduliks HC-12 tuginedes peamiselt tema kõige paremale levikaugusele võrreldes teiste katsetavate moodulitega. Kuna andurjaam töötab põhimõttel, et raadiosidemooduli toide lülitatakse välja olukorras, kus saatmist ei toimu, siis ei pea arvestama töövoolu suurusega, mis HC-12-l on NRFL24-ga võrreldes suurem (tabel 3.3).

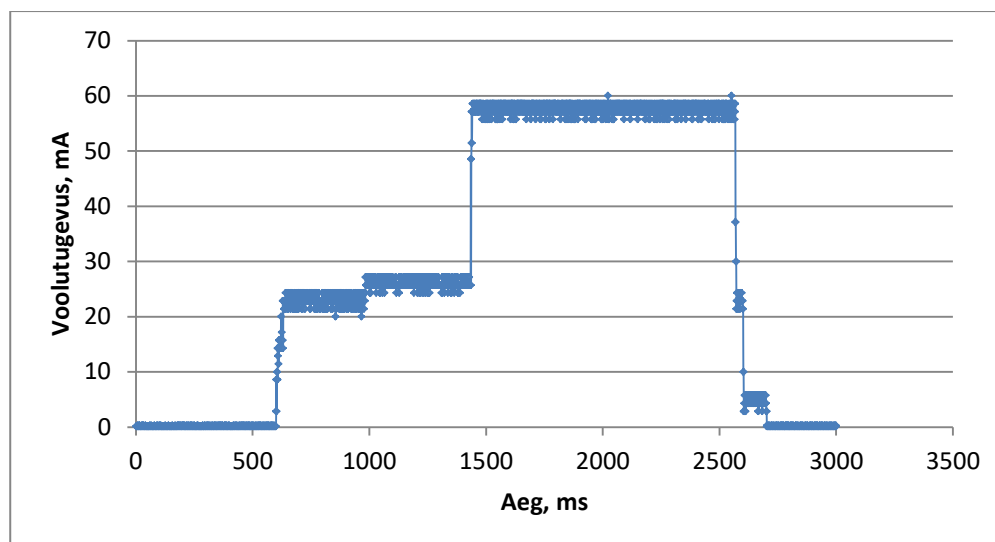
### **3.9. Andurjaama energiatarve**

Seadme energiatarve on oluline peamiselt kasutaja mugavuse pärast. Oluliselt lihtsam on patareide vahetamist meeles pidada juhul, kui seda tuleb teha igal aastal üks kord ja seda seadme paigaldamise hetkel taime vegetatsiooniperioodi algusel.

Andurjaama energiatarbe vähendamiseks on kasutatud magistritöös mitmeid võtteid:

- MOSFETI transistori kasutamine lülitina;
- Moodulitelt leedide eemaldamine;
- Mikroprotsessori lülitamiseks magamisrežiimi ja äratamiseks kasutatakse reaalaajakella;
- Muud programmilised seadistamisvõtted.

Seadme energiatarve määramiseks sooritati katse, kus ostsilloskoobiga Peactech 1240 mõõdeti andurjaama ees asuva  $56\ \Omega$  suuruse takisti pingelang. Takisti väärtuse ja takistil tekkinud pingelangu alusel saab Ohmi seadusega arvutada andurjaama voolutugevuse. Katse tulemus on näha joonisel 3.16.



**Joonis 3.16.** Andurjaama plaadi voolutugevus

Toiteallikat koormava voolu tugevus andurjaama magamisrežiimis on  $80 \mu\text{A}$ , mõõtmisrežiimis keskmiselt  $24 \text{ mA}$  ja saatmisrežiimis keskmiselt  $59 \text{ mA}$ . Erinevate programmiosade kestvused on vastavalt magamisrežiimis  $900 \text{ s}$ , mõõtmisrežiimis  $0,7 \text{ s}$  ja saatmisrežiimis  $1,2 \text{ s}$ . Vastavalt mõõtmistulemustele on valemi (3.3) abil arvutatud andurseadme töösükli kestel energiaallikast kasutatud elektrihulk:

$$E = t_0 \cdot I_0 + t_1 \cdot I_1 + t_2 \cdot I_2, \quad (3.3)$$

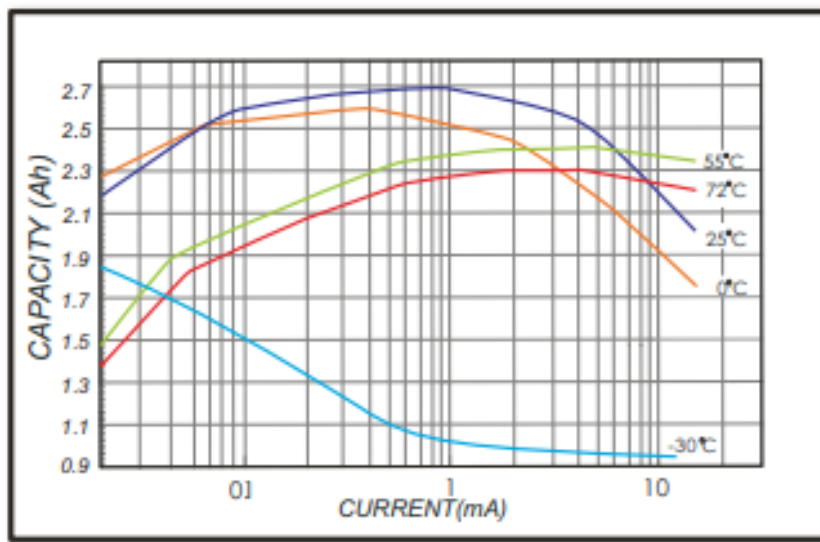
kus  $E$  on töösükli poolt kulutatud elektrihulk  $\text{mA} \cdot \text{h}$ ;  
 $I_0$  – keskmine voolutugevus magamisrežiimis  $\text{mA}$ ;  
 $t_0$  – magamisrežiimi ajaline kestvus  $\text{h}$ ;  
 $I_1$  – keskmine voolutugevus mõõtmisrežiimis  $\text{mA}$ ;  
 $t_1$  – mõõtmisrežiimi ajaline kestvus  $\text{h}$ ;  
 $I_2$  – keskmine voolutugevus saatmisrežiimis  $\text{mA}$ ;  
 $t_2$  – saatmisrežiimi ajaline kestvus  $\text{h}$ ;

$$E = 0.25 \cdot 0.08 + 0.00019 \cdot 24 + 0.00033 \cdot 59 = 0.044 \text{ mA} \cdot \text{h}$$

Ühe töösükli poolt kulutatud elektrihulk on  $0,044 \text{ mA} \cdot \text{h}$ .

Toiteallika valimine andurjaamale osutus raskes seetõttu, et tegemist pole pideva madala energiatarbimisega projektiga, kus tööpinge on  $3,3 \text{ V}$ , vaid muutuva energiatarbimisega projektiga. Seda tänu raadiosidemooduli HC-12 suurele energiatarbele saatmisrežiimis. Autor otsustas käesolevas projektis suurema levikauguse kasuks, mis nõuab omakorda suurema tööpingega ja kallimat energiaallikat. Patareiks on töös valitud  $3,6 \text{ V}$  Liitum

element EVE ER14505, mille mahutavus on kuni 2700 mA·h[37]. Ühendades kaks elementi jadamisi saavutatakse pinge 7,2 V, mis on suuteline toitma andurjaama. Elemendi andmelehel[37] on leitav elemendi mahutavuse määramise joonis 3.17.



**Joonis 3.17.** Elemendi mahutavuse sõltuvus voolutarbest ja ümbritsevast temperatuurist[37]

Andurjaamal on normaalseks talituseks vaja vähemalt 5 V pinget. Kui pinge langeb alla selle, siis mikroprotsessor Arduino Pro mini töötab küll edasi, aga HC-12 ei tööta enam täisvõimsusel ja levikaugus väheneb. Jagades töötsükli jooksul kulutatud energia töötsükli pikkusega saame, et andurjaama keskmine voolutugevus on 0,176 mA. Andurjaam töötab keskmiselt temperatuuril +5 °C. Vegetatsiooniperioodiks loetakse meteoroloogiliselt perioodi, mille kestel ööpäeva keskmine õhutemperatuur on püsivalt üle 5 °C [18]. Selle põhjal saab joonise 3.17 toel teha ligikaudse järelduse, et patarei mahutavus andurjaama tarbimisrežiimil on vähemalt 2500 mA·h. Kuna mahutavus jääb elementide jadamisi ühendades samaks, siis saab leida valitud patareiga töötsüklite arvu:

$$a = \frac{Q}{E} = \frac{2500}{0.044} = 56818 \quad (3.4)$$

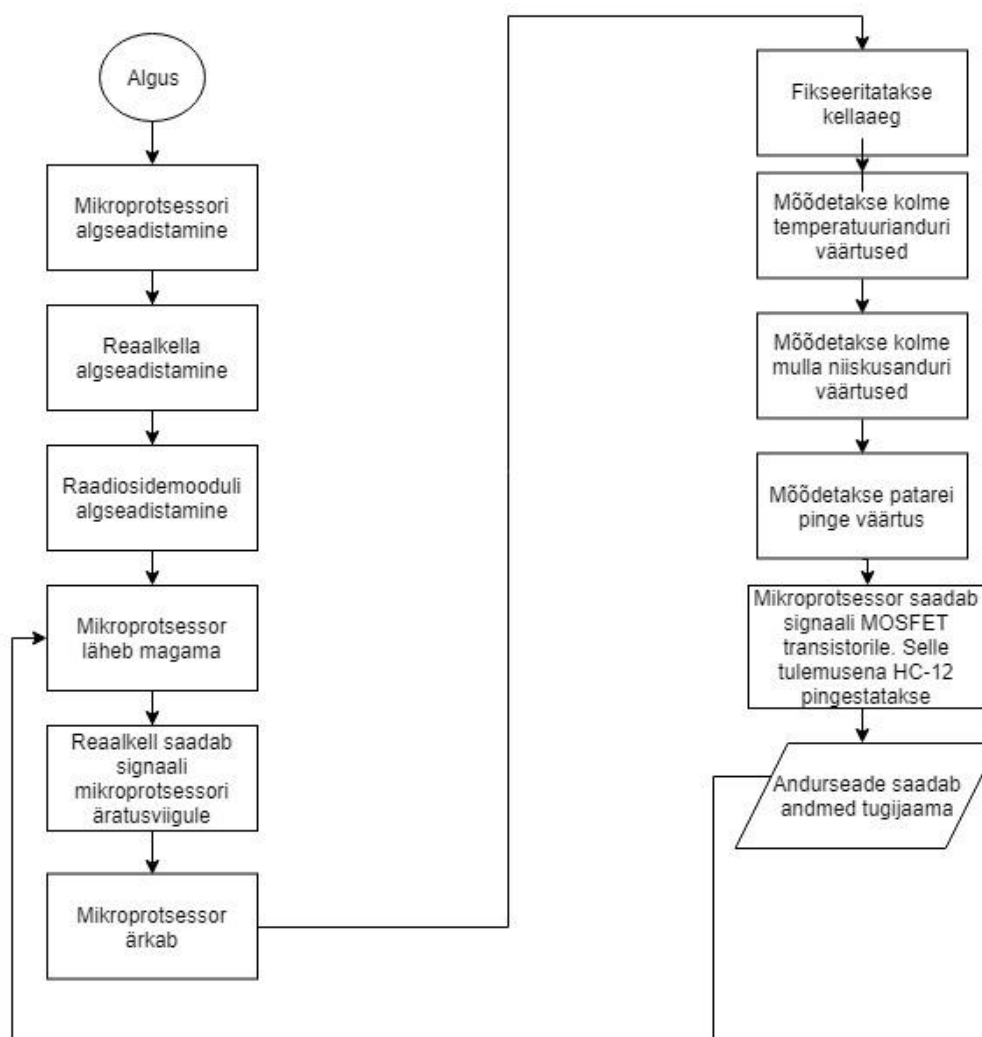
kus  $a$  on tsüklite arv;

$Q$  – patarei mahutavus mA·h.

Valemi 3.4 järgi on valitud elementidega võimalik sooritada 56818 tsüklit, mis teeb ajaliselt 593 päeva. Eelnevalt sai määratletud, et andurjaam peab vastu pidama patareitoitel vähemalt ühe vegetatsiooniperioodi ehk 190-200 päeva. Kasutatavate patareidega on võimalik andurjaama töös hoida isegi kaks vegetatsiooniperioodi.

### 3.10. Andurjaama juhtprogramm

Andurjaama programmeerimiseks on kasutatud USB-TTL konverter-moodulit. USB ühendatakse arvutisse ja teine pool Arduino Pro Mini programmeerimisviikudega. Programmikood on loodud Arduino IDE keskkonnas. Programmi lihtsustatud plokkiskeem on joonisel 3.18.



**Joonis 3.18.** Andurjaama juhtprogrammi plokkiskeem

Programm alustab tööd, kui seadmele lülitatakse külge toiteallikas. Programm ise mingit kommunikatsiooni kasutajaga ei vaja ehk on täiesti haldusvaba. Esimesena seadistatakse erinevad algseadistused. Mikroprotsessorile antakse ette konstandid ja määratakse kasutuses olevad viigud. Samuti lisatakse programmikoodi erinevad teegid. Seejärel seadistatakse reaallaja kellamoodulil alarmi kellaajad. Funktsiooni abil kuvab reaallaja kellamoodul alarmsignaali ettemääratud kellaajal äratades sellega mikroprotsessori.

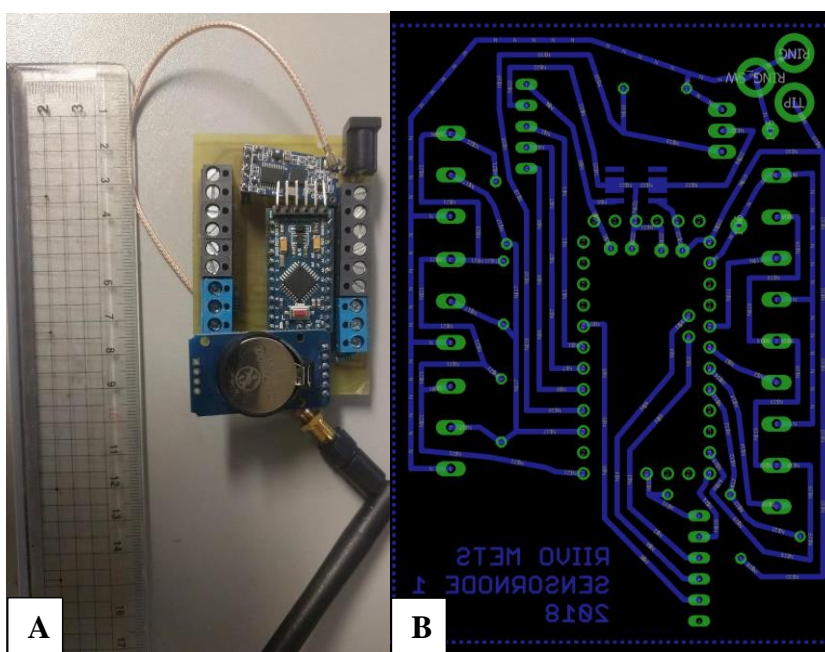


Raadiosidemoodulil määratakse töökanal ja andmeedastuskiirus. Sellega lõpeb programmi seadistusosa ja programm siseneb lõpmatult korduvasse alamossa.

Programmi korduse alguses läheb mikroprotsessor unerežiimi hetkeni, millal reaalaaja kellamoodul saadab signaali mikroprotsessori äratusviigule. Selle signaali peale mikroprotsessor ärkab ja alustab oma tööd. Esimesena fikseeritakse kellaaeg. Seejärel mõõdetakse temperatuuriandurite ja mulla niiskusandurite arvulised väärtused. Samuti tehakse kindlaks toitemooduli pinge väärtus. Seejärel annab mikroprotsessor signaali MOSFET transistorile, mille tulemusena pingestatakse raadiosidemoodul. Side saavutamisel saadab raadiosidemoodul eelnevalt mõõdetud väärtused tugijaama, kui sidet ei saavutata etteantud aja vältel jäävad andmed saatmata. Peale saatmist läheb mikroprotsessor uuesti unerežiimi ja jääb ootama uut alarmsignaali.

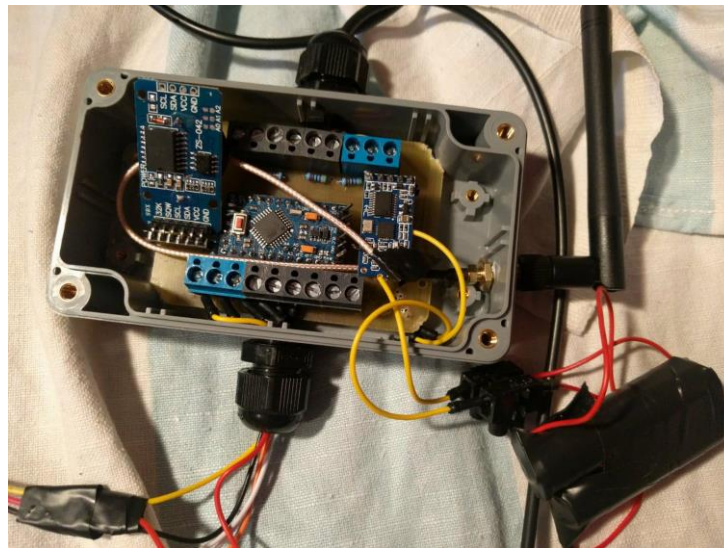
### 3.11. Andurjaama disain

Töö tulemusena valmis joonisel 3.19 (A) oleva andurjaama plaat. Andurjaam on suuteline mõõtma korraga kolme mullaniiskust ja kolme temperatuurianduri väärtusi ja need edastama tugijaamale. Andurjaama ehitamiseks loodi Eagle keskkonnas trükkplaadi voluradade skeem (joonis 3.19 (B)).



**Joonis 3.19** Andurjaama plaadi valmimine: A-valminud andurjaama plaat; B-andurjaama plaadi voluradade skeem.

Andurjaama kasutamisel on oluline seadme niiskuskindlus, kuna seade hakkab töötama väliskeskkonnas. Niiskusele vastupidavuse saavutamiseks kaetakse trükkplaadi volurajad ja jootekohad spetsiaalse lakiga Lakier PVB 60, mis kindlustab trükkplaadi komponentide kaitse vee eest. Teiseks asetatakse andurjaam veekindlasse karpi. Välja tuuakse ainult temperatuuriandurite ja mulla niiskusandurite juhtmed. Niiskusandurid kaeti sama lakiga ja lisaks pandi peale termokahanev rüüs. Valminud andurjaam ilma kaaneta on näha joonisel 3.20.



**Joonis 3.20.** Andurjaam

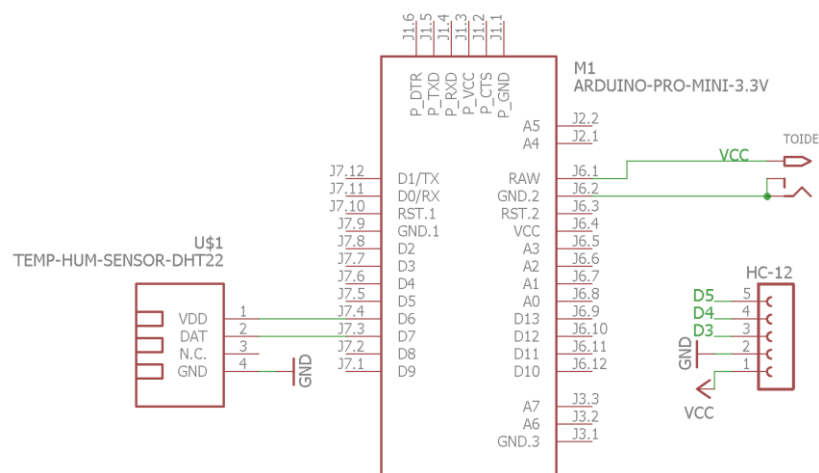
Magistritöö raames valmistati kolm andurjaama.



## 4. TUGIJAAMA KUJUNDAMINE

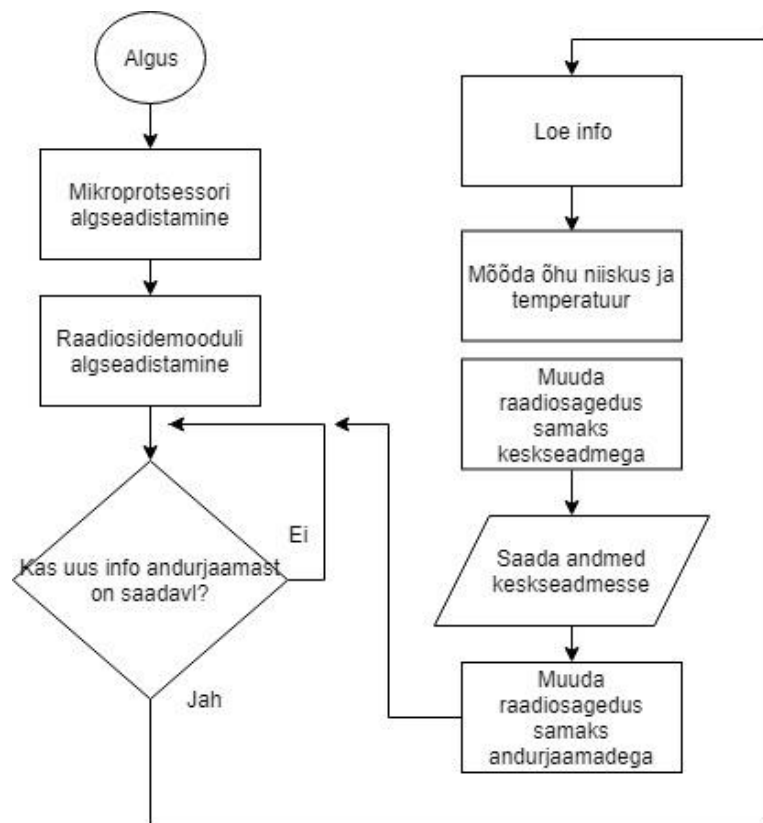
### 4.1. Eesmärk ja tööpõhimõte

Tugijaam täidab käesolevas magistritöös kahte eesmärki. Esimeseks on andmete vahendamine andurjaamade ja keskseadme vahel. Teiseks ülesandeks on õhu niiskuse mõõtmine ja keskseadmele edastamine. Tugijaam koosneb kolmest komponendist. Mikroprotsessor ja raadiosidemoodul on sama, mis andurjaamas. Erinevaks komponendiks on õhu niiskuse ja temperatuuri andur DHT22 [38]. Tugijaama elektriline skeem on esitatud joonisel 4.1.



**Joonis 4.1.** Tugijaama elektriskeem

Tugijaam erinevalt andurjaamast on ühendatud stabiilse 5 V pingega toiteallikaga. See lihtsustab skeemi, kuna raadiosidemoodulile ei pea pingeregulaatorit panema. Tugijaama programmi plokkiskeem on esitatud joonisel 4.2.



**Joonis 4.2.** Tugijaama programmi plokkskeem

Programmi põhimõtte kohaselt kontrollib mikroprotsessor kogu aeg uue info olemasolu. Uue infopaketi saabudes mõõdab tugijaam õhu niiskust ja lisab selle infopaketi. Seejärel saadetakse info edasi keskseadmesse. Andurjaamade ja tugijaam suhtlevad erineval sagedusel kui tugijaam ja keskseade. See on vajalik, et infopakettid üksteist segama ei hakkaks. Kui andurjaam on keskseadmele lähemal kui 600 meetrit võib jõuda keskseadmeni kaks identset infopaketti. Üks läbi tugijaama ja teine otse andurjaamast. Selle olukorra vältimiseks suheldaks erinevatel raadiosagedustel. HC-12 on võimalik seadistada saajasse erinevasse raadiosagedusse. Sageduste vahe on 400 KHz. Kanal üks on 433,4 MHz ja kanal sada 473 MHz. [20]

Tugijaamaga on võimalik suurendada süsteemiga teenindatava ala suurust. Raadioside katsetest saime teada, et HC-12 on suuteline suhtlema 100% levi kvaliteediga 600 meetri kauguselt. Paigaldades tugijaama andurjaamadest 600 meetri kaugusele ja keskseadme omakorda tugijaamast 600 meetri kaugusele on võimalik levikaugust sellisse lihtsa võttega tõsta kahekordseks 1200 meetrini. Tugijaamu võib lisada vajadusel veelgi, kui on vajadus andurjaamu paigaldada keskseadmest veelgi kaugemale.

## 4.2. Tugijaama disain

Tugijaam on ehitatud sarnaselt andurjaamale karpi. Karbist ulatuvad välja toitejuhe ja raadiosidemooduli antenn. Joodetud kontaktid kaeti termokahaneva rüüsisga. Valmis tugijaam on näha joonisel 4.3.



**Joonis 4.3.** Mulla olekuparameetrite andmehõivesüsteemi tugijaam

Tugijaama korpuses on avaus, mis tagab, et andurjaama korpuses asuv niiskusanur DHT22 mõõdab välise õhu niiskust. Andurit ei tahetud asetada korpusest väljapoole, kuna teadaolevalt mõjutab anduri tööd vihmapihksmed [38]. Käesolevas magistritöös valmistati üks tugijaam, mis on suuteline suhtlema kolme andurjaamaga ja keskseadmega.

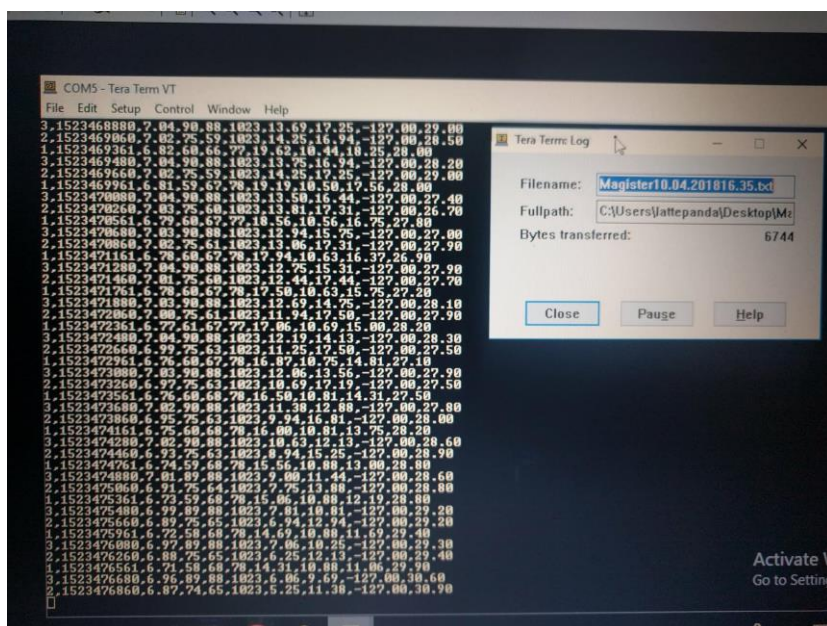
## 5. KESKSEADME KUJUNDAMINE

### 5.1. Keskseadme eesmärk ja tööpõhimõte

Ruumis asuv keskseade kogub infot alamseadmetelt, milleks on projektis andurjaamad ja tugijaam. Keskseadme ülesanded on:

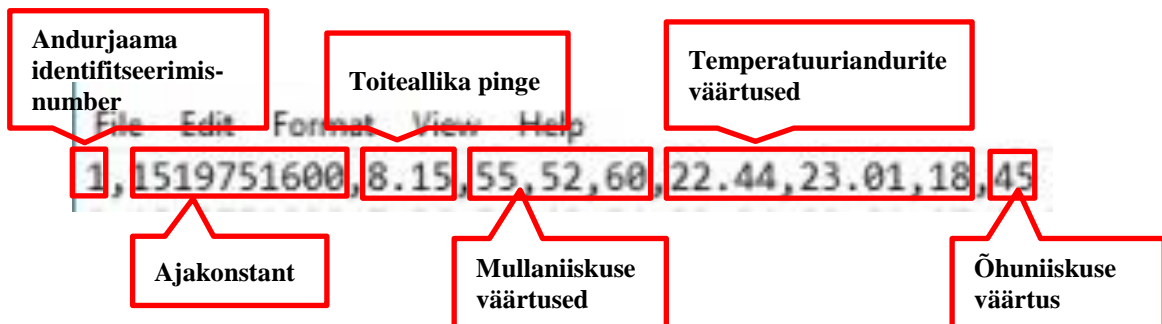
- Andmete kogumine;
- Andmete hoiustamine;
- Andmete töötlemine;
- Andmete kuvamine reaalaajagraafikutena.

Keskseade on andmehõivesüsteemi kasutajale mõõtetulemuste visualiseerimise vahend. Süsteemi juhib Windowsi-põhine arendusplaat Lattepanda [39]. Andmete kogumise eest hoolitseb HC-12 raadiosidemoodul, mis suhtleb Arduino Leonardoga. Andmete hoiustamiseks kasutatakse jadaliidest. Lattepandas on sisse programmeeritud, et jadaliides numbriga 5 on Arduino Leonardoga suhtlusliides, mis sisaldab Arduino Leonardo moodulit[39]. Selle kaudu suhtleb Lattepanda mikroprotsessor Arduino mikroprotsessoriga. Seda suhtlust saab kuvada kasutades programmi Tera Term ja tekitada vastava logi faili, mis kõik kuvatud andmed salvestab arvuti. Joonisel 5.1 on näha Tera Termi kuvatõmmist, kus Teraterm parasjagu salvestab andmeid faili.



Joonis 5.1. Teraterm salvestab saabuvaid infopakette

Igakord kui keskseadmeni jõuab uus infopakett, kuvatakse see Tera Termis ja salvestatakse kasutaja poolt valitud TXT-formaadiga faili. Jooniselt 5.2 on näha infopaketi kuju.



**Joonis 5.2.** Infopaketi kuju

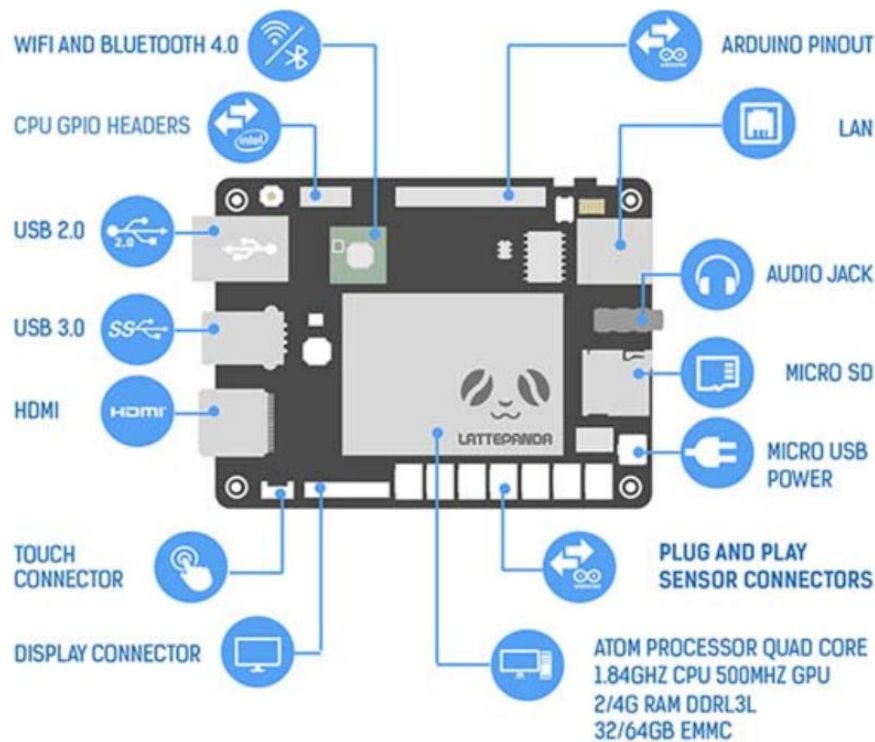
Infopakett koosneb arvudest, mis on eraldatud komaga. Esimene number on seadme identifitseerimisnumber. Igal andurjaamal on eraldi number, et oleks võimalik eristada, milliselt jaamalt on andmed saadud. Teine number on aega väljendav konstant. Seda saab teisendada kuupäevaks ja kellaajaks. Aega väljendava konstandi numbriliseks väärtuseks on sekundid reaalaaja kellamooduli ajaarvamise algusest. Kolmas number on andurjaama mooduli toiteallika pinge. Nelja, viies ja kuues on temperatuuriandurite näidud. Seitsmes, kaheksas ja üheksas on niiskusandurite mõõdetud väärtused. Kümnes arv on õhuniiskus, mille lisas andmepaketile tugijaam.

Andmete töötlemiseks ja kuvamiseks koostati programmeerimiskeele Python keskkonnas kasutajaliidese programm. Andmehõivesüsteemile esitatavate nõuete formuleerimisel oli üheks vajalikuks aspektiks reaalaajagraafikute tekitamine. Kasutajale on mugavam, kui graafikuid kuvatakse reaalaajas ja ilma igasuguse kõrvalise abita. Selle ülesande lahendamiseks kasutati teeki Matplotlib [40], mis on graafiline abivahend Pythoni kasutajale. Andmete graafilisest kuvamisest on detailsemalt räägitud alampunktis „Kasutajaliides ja reaalaaja graafikud“.

## 5.2. Lattepanda

Käesolevas magistritöös on kasutatud turul uutset toodet nimega Lattepanda. LattePanda on hetkel turul üks võimsamatest arendusplaatidest. See põhineb Intel Atom CherryTrail mikroprotsessoril Intel Z8350 Quad Core, taktisagedusega 1,4–1,9 GHz, mis suudab

jooksutada peale Windowsi täisversiooni ka tööriistu nagu Visual Studio, NodeJS ja Java. Peamine omadus, miks LattePanda valiti sellesse projekti on asjaolu, et see sisaldab kaasprotsessorina Arduinoga Leonardo protsessorit, tänu millele saab seda kasutada füüsilise Iot (*Internet of Things*) maailma juhtimiseks ja nende signaalide mõistmiseks, nagu tavalist Arduinot. Arendusplaadi liidesed on näha joonisel 5.3. [39]

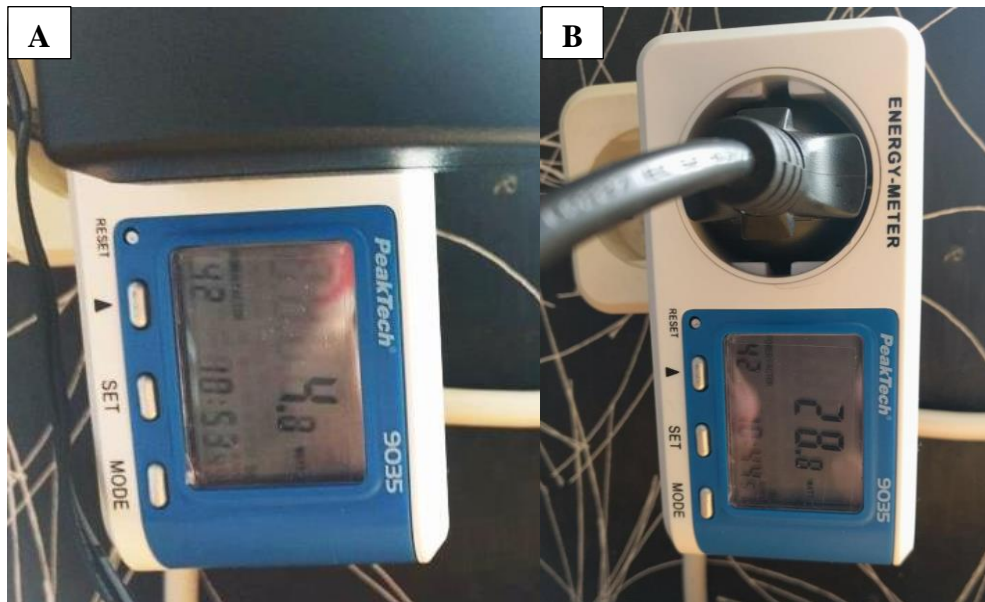


**Joonis 5.3.** LattePanda erinevad liidesed [39]

Muretsatud LattePandal on 2GB DDR3 muutmälu ja kõvaketta suurus on 32 GB [39]. See arendusplaat muudab käesolevas magistritöös arendatava andmehõivesüsteemi kompaktses. Kasutaja ei vaja eraldi arvutit, et jälgida andmeid reaalsajas. LattePanda on oma parameetritega piisavalt võimas tööriist, et tagada kogu andmehõivesüsteemi toimimine. Süsteemi saab luua ka sülearvuti baasil, aga sellel juhul peaks arvuti olema kohtkindel ja andmete kogumine potentsiaalselt segaks sülearvutiga tehtavat igapäevatööd.

Toites LattePandat läbi energiamõõtja adapterliidese PeacTech 9035 saab jälgida, kui suur on seadme energiatarve. Joonisel 5.4 (A) on näha, et LattePanda energiatarve on tööhelkel 4,8 W ja joonisel 5.4 (B) on keskmise jõudlusega sülearvuti (Dell Inspiron 15) energiatarve on 28,8 W.





**Joonis 5.4.** Lattepanda (A) ja sülearvuti (B) energiatarve võrdlus

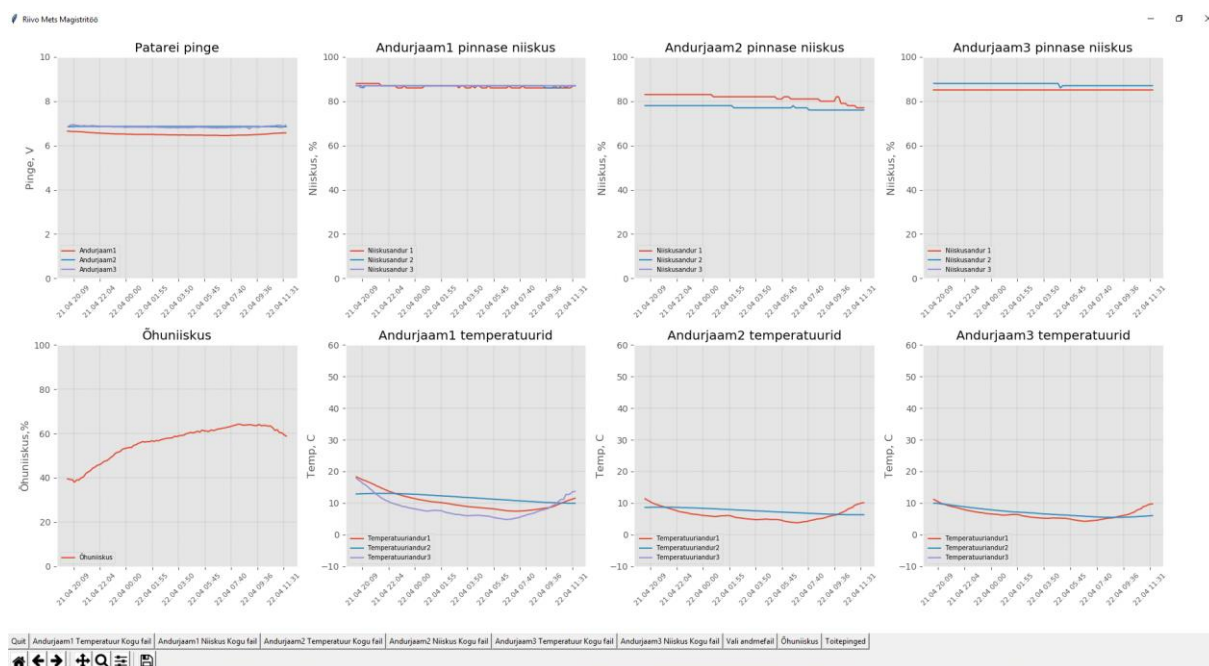
Jooniselt 5.4 nähtavate tarbimiste juures (Lattepanda 4,8 W ja sülearvuti 28,8 W) oleks Lattepanda ühe vegetatsiooniperioodi elektritarbimine 23,04 kW·h ja sülearvuti elektritarbimine 138,24 kW·h. Sülearvuti tarbimine on ligikaudu 6 korda suurem. Kuna andmehõivesüsteem töötab ööpäevaringselt, siis madal energiatarve on oluline põhjus, miks Lattepanda kasutamine on põhjendatud.

### 5.3. Kasutajaliides ja reaalaaja graafikud

Andmehõivesüsteemi kogutud andmete kuvamiseks on loodud nagu ennist mainitud vabavaralises programmeerimiskeeles Python kasutajaliides. Kasutajaliidese eesmärk on kuvada andmeid reaajas ehk andmed kuvatakse ekraanil automaatselt peale saabumist andurjaamadest. See muudab kasutajale süsteemi töö jälgimise mugavaks. Kasutajaliides on loodud kasutades teek Matplotlib ja TkInter .

Matplotlib on Pythoni 2D graafikateek. Matplotlibi abil on võimalik kuvada erinevat tüüpi 2D graafikuid. Paari programmeerimisega on võimalik kuvada graafikutüüpe nagu tulpdiagrammid, histogrammid, joondiagrammid jne. Teek pakub MATLAB- sarnast liidest. Kasutajal on täielik kontroll joonte -, telgede - ja kirjastiili parameetrite üle jne. Käesoleva projekti jaoks on kõige olulisem funktsiooni *animate* olemasolu. Funktsioon võimaldab reaalaaja animatsiooni kuvamist. [40]

TKInter on graafilise kasutajaliidese GUI (*Graphical User Interface*) loomise moodul, mis kuulub Pythoni standardvarustusse [41]. Joonisel 5.5. on näha kasutajaliidese avaleht.

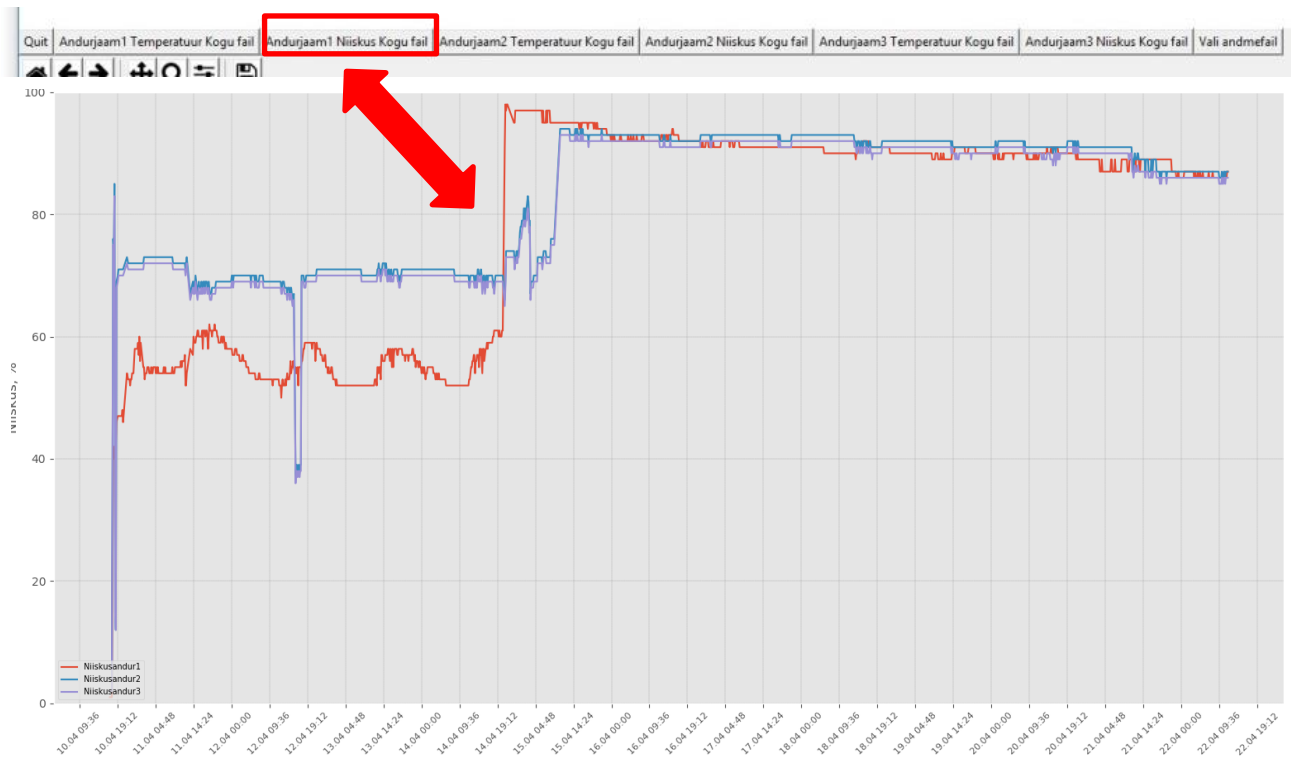


**Joonis 5.5.** Kasutajaliidese avaleht

Joonisel 5.5 on näha kaheksat erinevat graafikut. Kasutajaliidese vasakul üleval asuval graafikul kuvatakse andurjaamade toiteallikate pinged. Selle info põhjal saab kasutaja langetada otsuse toiteallika vahetamise kohta. Sellise lahenduse abil saab patareides olevat energiat kasutada maksimaalsel määral. Graafikul, mis asub toiteallika pinge graafiku all, kuvatakse õhuniiskuse väärtused. Kolm ülemist graafikut kuvavad andurjaamade mullaniiskuse andurite abil kogutud väärtusi ja alumised kolm andurjaamade temperatuuriandurite abil kogutud väärtusi. Kõik graafikud uuendavad enda andmeid iga 5 minuti tagant.

Kõik graafikud kuvavad andmed, mis puudutavad viimast 24 tundi. Kui kasutaja tahab kuvada kõik logi failis olevaid andmeid siis, on selleks loodud kasutajaliidese alla nupud, mis seda võimaldavad. Joonisel 5.6 on näidatud andurjaama 1 mullaniiskuseandurite koguinfot.





**Joonis 5.6.** Andurjaama mullaniiskuse andurite abil kogutud info kuvamine

Programmi käivitamisel palub programm valida faili, millesse parasjagu Tera Term oma andmeid reaajas salvestab. Andmefaili saab vahetada vajutades nuppu „Vali andmefail“ (joonis 5.6), mille tulemusena laetakse andmed uuest kasutaja poolt valitud andmefailist.

## 6. ANDMEHÕIVESÜSTEEMI KATSETAMINE

### 6.1. Katse kirjeldus

Andmehõivesüsteemi töökindluse ja funktsionaalsuse katsetamiseks on vajalik süsteem tööle panna reaalses olukorras. Süsteem pandi mulla olekuparameetreid mõõtma kolmest eri punktist. Andurjaamade, tugijaama ja keskseadme asukohad on näidatud joonisel 6.1.

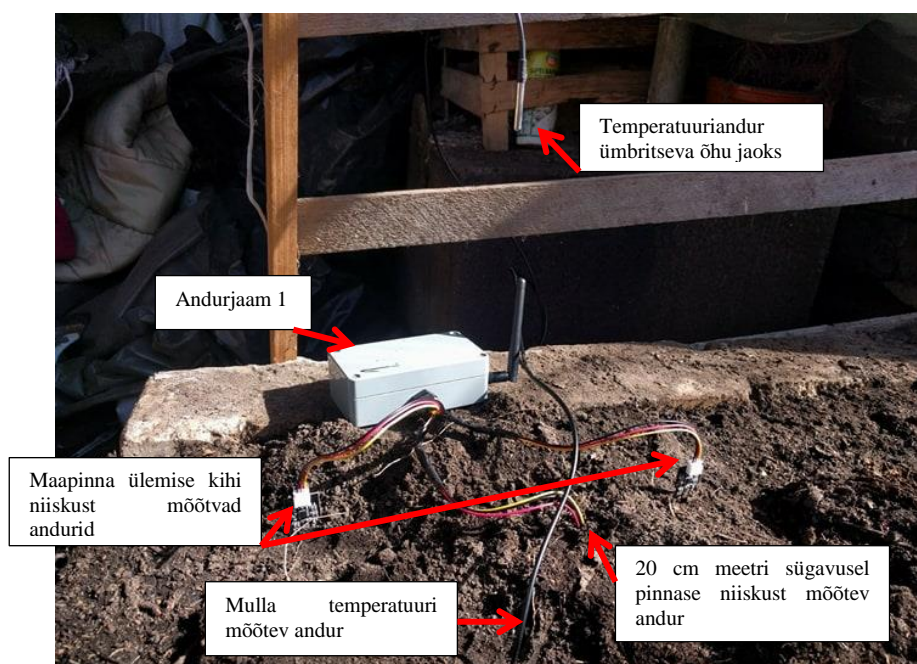


**Joonis 6.1.** Andmehõivesüsteemi seadmete positsioneerimine katse sooritamise ajal:  
Punased ringid- andurjaamad; Sinine ring- tugijaam; Kollane ring- keskseade.

Katse sooritati 10.04.2018 kuni 22.04.2018. Selle ajal oli ilmastikuolud veel suhteliselt keerulised. Maapind niiske/külmunud ja öised temperatuurid alla null kraadi. Katse tulemuste variatsioonide suurendamiseks pandi andurjaam 1 mõõtma kasvuhoonesse, kus ümbritsevad keskkonnaolud olid soodsamad. See tagas vähemalt ühe andurjaama mõõteandmed katseperioodi vältel juhul kui teised kaks (andurjaam 2 ja 3) välistingimustele ei oleks vastu pidanud. Mõõteintervall määrati katseperioodil 10 minutit.

Andurjaama 1 kaugus tugijaamast oli 20 meetrit, andurjaama 2 kaugus tugijaamast 50 meetrit ja andurjaama 3 kaugus tugijaamast 90 meetrit.

Andurjaamal 1 oli küljes kolm mulla niiskuse andurit ja kolm temperatuuri andurit. Niiskusandur 1 mõõtis niiskust 20 cm sügavusel. Teine ja kolmas andur mõõtsid mulla pinnapealselt niiskust. Esimene temperatuuriandur mõõtis ümbritseva õhu temperatuuri, teine andur pinnase temperatuuri ja kolmas temperatuuriandur on paigaldatud andurjaama sisse. Andurjaamadel 2 ja 3 on küljes kaks mulla niiskuse andurit ja kaks temperatuuriandurit. Esimene niiskusandur on paigaldatud 20 cm sügavusele maapinda ja teine maapinna ülemisse kihti. Esimene temperatuuriandur mõõdab maapinna temperatuuri ja teine andur asetseb andurjaamade sees, mis mõõdab ümbritsevat õhutemperatuuri. Andurjaama 1 paigaldatud kujul on näha joonisel 6.2.



**Joonis 6.2.** Andurjaam 1 mõõteolukorras

Tugijaam asetati lähima hoone katuseräästa alla, et vältida võimalust, et vihm otseselt saaks sellele peale sadada. Tugijaam ühendati stabiilsesse toitevõrku. Tugijaam asetses keskseadmest 25 meetri kaugusel. Lisaks oli takistuseks maja seinad, kuna keskseade asetses elumaja siseruumides.

## 6.2. Katsetulemuste analüüs

Andmehõivesüsteemi katsetamise tulemused esitatakse andurjaamade kaupa. Andurjaam 1 paiknes kasvuhoones. Lisas A on näha andurjaama 1 kogutud temperatuuriandmed 12-päevase katseperioodi jooksul. Välja on joonistunud päevade ja ööde temperatuuri erinevused. Temperatuuriandurite 1 ja 3 mõõtetulemused on hästi võrreldavad. Temperatuuriandur 3 mõõtetulemuste väärtused on natuke suuremad seetõttu, et ta asub andurjaama korpuse sees, kus temperatuur tõuseb kõrgemale. Temperatuuriandur 2 mõõtetulemuste väärtused on tunduvalt väiksemad võrreldes teise kahe anduri mõõtetulemustega, mis tuleneb sellest, et andur 2 asetseb mulla sees, kus temperatuurid on madalamad. Andurjaama 1 poolt loetud mulla niiskused on näha lisas B. Graafiku alguse hüppelised muutused on tingitud süsteemi paigaldamisest ja katsetamisest. Edaspidi on näha parameetrite sujuvad muutused pikema aja vältel. Andurite mõõtetulemustest võib väita, et sügavamal pinnases on niiskus väiksem kui ülemises kihis. See on seletatav andurite paiknemisega kasvuhoones, kus oli kuiv pinnas, mida alles niisutama hakati. Niiskus pole järelikult jõudnud veel alumistesse kihtidesse. 14. aprillil kell 19:30 kasteti kasvuhoones mulda, mis kajastub lisas B oleval graafikul. Niiskusandur 1 reageeris kastmisele koheselt tõustes 58% 98%-ni. Niiskusandurite 2 ja 3 mõõtmistulemused muutusid suurtes piirides peale kastmist mõne tunni vältel. Niiskusandurite 2 ja 3 näidud stabiliseerusid uuesti 15. aprill kell 4:43. Andurjaama 1 töös muid kõrvalekaldeid ega häireid katseperioodil ei tuvastatud.

Andurjaama 2 mõõtetulemused on esitatud lisas C ja D. Lisas C on näha andurjaama 2 mõõdetud temperatuuri näidud. Graafiku tulemused näitavad, et pinnase temperatuur, mida mõõtis temperatuuriandur 2, on öösi 2-3 °C ligikal, päeval päikese käes tõuseb pinnase temperatuur ligikaudu 10 °C. Päikese käes ümbritseva õhu temperatuuri kõikumised, mida mõõdab andur 2, on andurjaam ilusti fikseerinud. Andurjaama 2 töös katseperioodil ilmnemiseid üksikud kõrvalekaldeid. Mõõtetulemustest on näha, et signaal hüppas äärmusesse 14. aprillil kell 10:00. Temperatuurianduri 1 väärtus hüppas korraks -127 °C. Põhjuseks arvatavasti andurjaama toite katkestamine seadme hooldamise ajal. Lisas D oleval graafiku alguse hüppelised muutused on tingitud süsteemi paigaldamisest. Niiskusandurite mõõtetulemustest võib väita, et pinnas on väga niiske või isegi vettinud, kuna mulla niiskus on 90% ligi. Alates 15. aprillist muutus ilm vihmasemaks, mis väljendub ka tulemustest. 17. aprillil olid tugevad vihmahood ja niiskusandurite töö tundub olevat

sellepärast häiritud. Samasuguseid häiringuid nägime andurjaama 1 töös, kui toimus mulla kastmine. Niiskusandur 2 oli sügavamal pinnases ja selle anduri näidud on häiringuvabad, aga pinnapealse anduri (joonisel niiskusandur 1) mõõdetud väärtused muutuvad suures ulatuses terve vihmase perioodi vältel. Anduri mõõtmistulemuste väärtused muutuvad stabiilsemaks peale vihmast perioodi.

Andurjaama 3 katsetulemused on näha lisas E ja F. Lisas E on näha andurjaama 3 temperatuuride mõõtmistulemused katseperioodi vältel. Tulemuste graafikult on näha, et pinnase temperatuur on öösiti 2-3 °C ligidal ja päeval päikese käes tõuseb pinnase temperatuur ligikaudu 10 °C. Andurjaam on ilusasti fikseerinud ümbritseva õhu kõikumised päikese toimel. Andurjaam 3 temperatuuriandurite töös kõrvalekaldeid, nagu andurjaamal 2, ei esinenud. Lisas F näidatud mõõtetulemustest võib järeldada, et pinnas oli läbinisti märg. Niiskusandurid annavad sarnaselt eelnevatele andurjaamadele laiaades piirides muutuvaid signaale intensiivse vihmahoo ajal, mis algas 17. aprill kella 10:00 paiku. Niiskusandur 2 oli sügavamal pinnases ja selle anduri näidud olid vähem häiritud kui pinnapealse anduri mõõdetud väärtused. Peale vihmase perioodi lõppemist tulemused stabiliseeruvad. Andurjaamad 2 ja 3 mõõtsid sama põllumaa eri punkte ja üldjoontes on tulemused sarnased. Kuna andurjaamade mõõtetulemused on üksteisega võrreldavad tõstab see süsteemi usaldusväarsust.

Lisaks eelnevatele graafikutele salvestati õhuniiskuse (lisa G) ja andurjaamade toitepingete (lisa H) väärtused. Õhuniiskuse mõõtmisega tegeles tugijaam. Lisas G näidatud graafik kinnitab andurjaamade temperatuuri- ja niiskusandurite väärtuste põhjal tehtud järeldusi, et alates 15. aprillist muutus ilm vihmasemaks, mis kulmineerus 17. aprilliga. Sellel päeval oli õhuniiskuse kõige suurem, mis oli tingitud suuremast vihmajärgest. Lisas H oleval graafikul on näidatud andurjaamade toitepinged ja andurjaama 1 ja 3 tunduvad usaldusväärsed. Kahtlusi tekitab andurjaama 2 toitepinge väärtused katseperioodi lõpu poole. Kui teiste andurjaamade toitepinge kasvab soojaga ja langeb külmema ilmaga, siis andurjaama 2 toitepinge ei muutu katseperioodi lõpu poole vastavalt temperatuurile. Võib väita, et andurjaama 2 toitepinge isegi kasvab stabiilselt aja vältel, mis ei ole kuidagi seletatav. Tundub, et toitepinge mõõtmise ahelas on häiringud, mis võib olla tingitud külmjoodetest või niiskusest.

### 6.3. Töökindlus ja tähelepanekud

Paaril korral andurjaamade töö katkes. Uurides põhjust lähemalt tuli välja, et andurjaama tarkvara lakkas töötamast hetkedel, kui andurjaama toiteahelas tekkis hetkeline katkestus. Olukord tekkis eeldatavalt andurjaamade liigutamise käigus. Andurjaama uuesti tööle saamiseks tuli andurjaam korraks täielikult toiteallikast eraldada, mis oli üpriski ebameeldiv tegevus. Sellise probleemi vältimiseks tuleks tagada andurjaama stabiilne toiteahel, mis ei katke põrutuste korral.

Mõõtetulemustest jäi silma mahtuvuslike pinnase niiskusandurite SEN0193 mõõdetud väärtuste muutumine laiades piirides vihmase perioodi ajal (lisa B,D,F). Sellised mõõtetulemused kahjustavad süsteemi usaldatavust. Töös üritati küll andur muuta niiskuskindlamaks, kattes komponendid spetsiaalse lakiga ja termorüüga, aga tundub, et see ei välistanud probleeme. Andmehõivesüsteemi edasi arendades tuleks mõelda andurite täiustamise peale.

Võib väita, et andurjaamad suutsid väliskeskkonnas oma tööga rahuldavalt hakkama saada. Katseperioodi andmed saadi kätte ilma oluliste kadudeta. Ainukesed kaod tekkisid, kui andurjaama paigaldamisel toitepinge katkestamisel lakkas tarkvara töötamast katseperioodi alguse. Need häiringud eemaldati esimese võimalusel hoolduse käigus. Ajaperiood, mille jooksul katse sooritati, andis korraliku ülevaate andurjaamade töökindluse kohta erinevate ilmastikutingimustes. Seda eelkõige tänu asjaolule, et sellel perioodil sadas nii vihma kui paistis päike, öösiti olid kohati üksikud külmakraadid ja päeval oli päikese käes vahepeal ligi paarkümmend kraadi sooja. Andurjaamad olid suutelised töötama terve selle ajaperioodi vältel, mistõttu võib lugeda katse õnnestunuks.

## 7. TULEMUSED JA ANALÜÜS

### 7.1. Andmehõivesüsteemi haldus

Käesolevas magistritöös kirjeldatud andmehõivesüsteemi praktikas kasutusele võtmiseks tuleb läbida järgmised etapid:

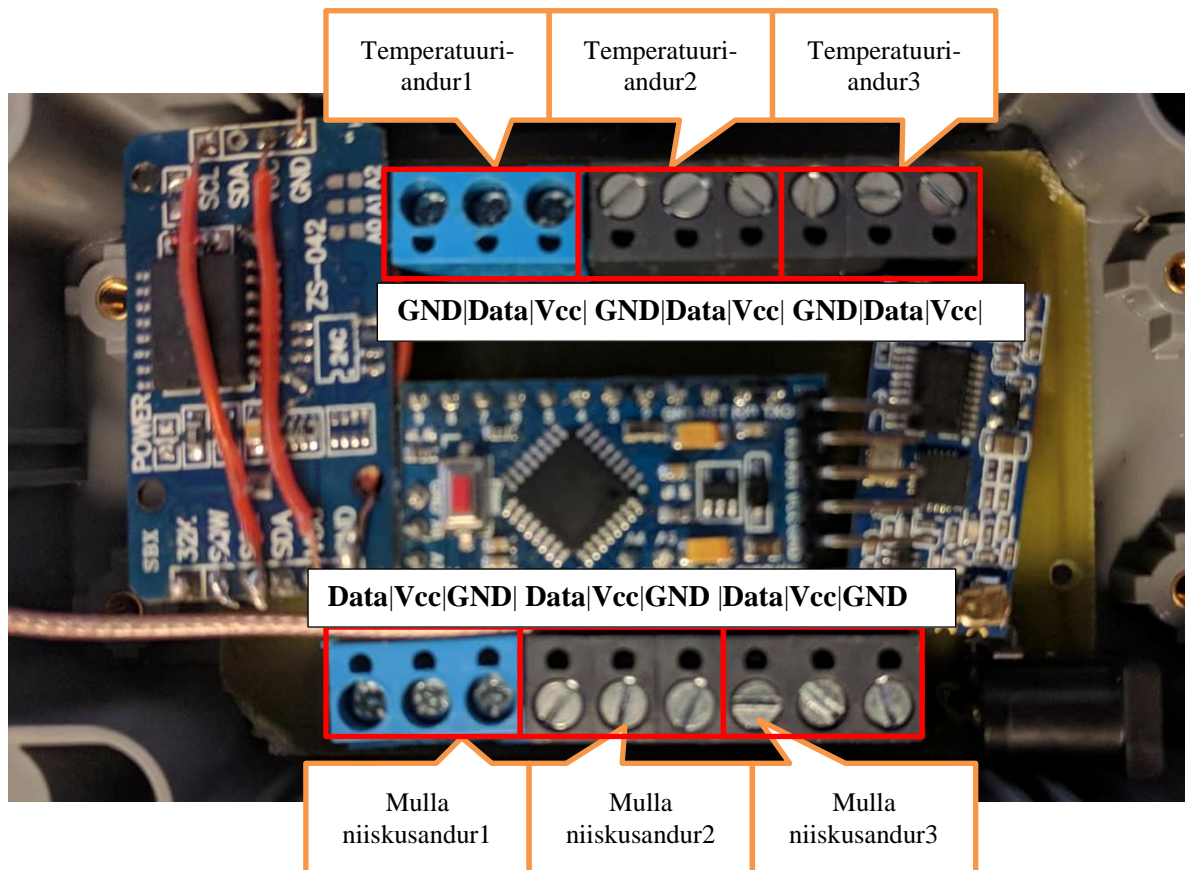
- Asetada töös valitud patareid andurjaamadesse ja paigaldada maa-alale andurjaamad nendesse punktidesse, kus tahetaks mulla- ja õhu olekuparameetrid mõõta.
- Paigaldada andurjaamade lähedusse (600 meetri raadiusse) tugijaam ja ühendada see stabiilsesse toitevõrku.
- Paigaldada keskseade mõõdetava maa-ala lähedal paiknevasse hoonesse (tugijaamast maksimaalselt 600 meetri kaugusele). Lattepanda tuleb ühendada toitevõrku ning järgi ühendada monitor ja hiir.
- Keskseadmes panna tööle programm Tera Term ja valida failnimi kuhu programm hakkab saabuvaid andmeid salvestama.
- Keskseadmes käivitada Pythonis valmistatud kasutajaliidese programm ja valida töödeldavaks andmefailiks sama fail, millesse pandi andmeid salvestama programm Tera Term. Pythonis valmistatud programmi käivitamiseks ei pea arvutisse olema installeeritud programmeerimiskeskkond Pythoni.

Kui kõik need etapid läbitud, siis on andmehõivesüsteem kasutamiskvalmis ja võimaldab jälgida, keskseadme külge ühendatud monitorilt saabuvate andmete alusel kujundatud graafikute kaudu, protsesse reaajas.

Hooldamist süsteem tervikuna ei vaja. Tuleks meele pidada, et talveperioodiks on soovitatav andurjaamad välitingimustest eemaldada, kuna seadme töövõime säilib tubastes oludes paremini. Lisaks on vaja vähemalt kahe kuu tagant pöörata tähelepanu andurjaamade toiteallikate tööpingele. Kui tööpinge langeb alla 5 V, siis tuleb andurjaamade patareisid vahetada, sest süsteem iseenesest jätkab tööd, aga raadiosidemooduli levikaugus hakkab vähenema ja andmesidepaketid ei pruugi jõuda keskseadmeni.



Andurite vahetamiseks tuleb andurjaamalt eemaldada kaas. Joonisel 7.1 on näidatud millised on andurjaama andurite järjekorranumbrid ja kontaktide nimetused. Neid tuleb paigaldamisel jälgida.



**Joonis 7.1.** Andurite järjekorranumbrid andurjaama plaadil

Keskseadme toiteallika katkemisel peab uuesti käivitada programmi Tera Term ja valima uuesti sama faili, kuhu eelnevalt andmeid salvestati. Programm hakkab automaatselt uusi andmeid salvestama andmefaili lõppu jättes eelnevaid andmed alles. Samuti tuleb uuesti käivitama kasutajaliidese programm.

## 7.2. Andmehõivesüsteemi maksumus

Andmehõivesüsteem koosnes kolmest eraldi seisvast seadmest: andurjaam, tugijaam ja keskseade. Projekti üheks eesmärgiks on valmistada hetkel turul olevatest moodulitest/komponentidest taskukohane andmehõivesüsteem. Hinna arvutamiseks koostati andmehõivesüsteemis kasutatud moodulite/komponentide nimekirjad. Andurjaama hinnakiri on näha tabelis 7.1.



**Tabel 7.1.** Andurjaama komponentide hinnad

Nr ja viide	Nimetus	Päritolu	Kogus, tk	Hind, €
1[42]	Trükkplaat 1-poolne	Oomipood	1/3	1,3
2[43]	Kruviklemm 3-ne	Oomipood	6	1,9
3[44]	1·20pin 2.54mm piikriba pesa	Oomipood	1	0,2
4[45]	Raadiosidemoodul HC-12	Aliexpress	1	3,3
5[46]	Reaalaja kellamoodul DS3231	Aliexpress	1	1,0
6[47]	Arduino Pro Mini	Aliexpress	1	1,9
7[48]	MOFSET IRL540n	Oomipood	1	1,1
8[49]	Veekindel temperatuuriandur DS18B20	Aliexpress	3	3,4
9[50]	Mulla niiskusandur SEN0193	Aliexpress	3	10,9
10[51]	Pingeregulaator LM78L05ACMX	Oomipood	1	0,7
11	Takistitid	Oomipood	7	0,7
12[52]	Patarei Liitium EVE ER14505 STD AA	Akuladu	2	6,4
13	20cm RP SMA Female to uFL/u.FL/IPX/IPEX RF Coax Adapter	Aliexpress	1	1,3
14	SMA antenn	Aliexpress	1	1,6
15[53]	Plastikkarp veekindel 40x65x115mm	Oomipood	1	6,6
16	Lakier PVB 60	Oomipood	1/4	1,2
17	Kondensaatorid	Oomipood	2	0,2
18	CR1616 Duracell liitium patarei	Oomipood	1	1,9
Kokku				45,6 €

Ühe andurjaama komponentide hinnaks kujunes 45,6 €. Tabelis 7.2. on välja toodud tugijaama komponentide hinnad.

**Tabel 7.2.** Tugijaama komponentide hinnad

Nr ja viide	Nimetus	Päritolu	Kogus,tk	Hind, €
1[47]	Arduino Pro Mini	Aliexpress	1	1,9
2[43]	Kruviklemm 3-ne	Oomipood	1	0,3
3[54]	Õhu niiskusandur DHT22	Aliexpress	1	2,1
4[45]	Raadiosidemoodul HC-12	Aliexpress	1	3,3
5	20cm RP SMA Female to uFL/u.FL/IPX/IPEX RF Coax Adapter	Aliexpress	1	1,3
6	SMA antenn	Aliexpress	1	1,6
7[53]	Plastikkarp veekindel 35x50x52mm	Oomipood	1	3,8
Kokku				14,2 €

Tugijaama hind tuli kokku 14,2 €. Tabelis 7.3. on kirjas keskseadme komponentide maksumus. Keskseadme maksumus on kirjas tabelis 7.3.

**Tabel 7.3.** Keskseadme komponentide hinnad

Nr ja viide	Nimetus	Päritolu	Kogus,tk	Hind, €
1[55]	Lattepana 2GB/32GB	DFRobot	1	102,3
2[45]	Raadiosidemoodul HC-12	Aliexpress	1	3,3
3	20cm RP SMA Female to uFL/u.FL/IPX/IPEX RF Coax Adapter	Aliexpress	1	1,3
4	SMA antenn	Aliexpress	1	1,6
5[56]	Lattepana korpus	Aliexpress	1	6,2
Kokku				114,6 €

Keskseadme maksumus on 114,6€. See teeb terve süsteemi maksumuseks, mis koosneb kolmest andurjaamast, tugijaamast ja keskseadmest 265,5 €. Kogu hinnast moodustab Lattepana arendusplaat 38,5%. Võrreldes töö alguses kirjeldatud seadmetega, mille hind jäi 800-2000 euro vahele on käesolev süsteemi koostamiseks kasutatud komponentide hind odavam. Hinna sisse ei ole loetud inimressursi hinda.

### 7.3. Edasiarenduse võimalused

Käesolevas magistritöös valminud andmehõivesüsteem on suuteline püstitatud eesmärgi täitma, aga kindlasti on süsteemi veel võimalik täiustada. Autor pakub siinkohal välja endapoolsed edasiarenduse ettepanekud:

- Hetkel kasutusel olevas raadiosidet võib kinni püüda ükskõik, kes on samal raadiosagedusel. Turvalisuse suurendamiseks tuleks tarkvaraliselt välja arendada sideprotokollide krüpteering;
- Kujundada andurjaamale kompaktne trükkplaat, millel asuksid kõik vajalikud komponendid ja andurjaama koostamiseks ei kasutataks valmis mooduleid. See muudaks andurjaama kindlasti kompaktsemaks. Seadme gabariidid ja omahind väheneks. Tuleks välja arendada trükkplaat, mis vastaks standardile (IEC ja EU). Nende olemasolul oleks seadet võimalik turustada;
- Projekteerida andurjaamadele ja tugijaamale juurde taaskäivitamise lüliti. Seadmete katsetamine näitas, et seadmed vajasis taaskäivitamist kui süsteemi töös tekkis tõrge. Hetkel kasutusesoleva andurjaamade ja tugijaama puhul tuli teha taaskäivitus manuaalselt seadme toite katkestamise abil. Andurjaamal tuli selleks kaas maha kruvida;
- Raadioside tuleks muuta töökindlamaks. Süsteem tuleks luua selline, et ükski andmesidepakett kaduma ei läheks. Andurjaam peaks olema suuteline salvestama

andmeid ka lokaalselt. Seda on vaja kui juhuslikult andmeside tugijaamaga katkeb. Hiljem kui andmeside taastub saadaks andurjaam kõik saatmata paketid tugijaama;

- Andurjaamade toiteallikaks kasutada taaslaetavaid akusid. Kasutaja ei peaks muretsema iga aasta uute patareide ostmise pärast;
- Kui soovitakse saada informatsiooni päikesekiirguse, tuule kiiruse, tuule suuna ja sademete hulga kohta tuleks süsteemiga ühendada lokaalne ilmajaam. Ilmajaama andmebaas oleks abiks erinevate taimekasvatustlike otsuste langetamiseks. Näiteks sobiks selleks ilmajaam WS1080 [57];
- Lisada süsteemile häire andmise funktsioon. Mingi parameetri langusel/tõusmisel ettemääratud piirini peaks süsteem andma kasutajale tähelepanuäratavalt (näiteks helisignaaliga) sellest teada. Häire võiks endas kujutada näiteks ka sõnumit telefoni.

Autor kavatseb vaadeldava magistritööga seoses valmistatud mulla- ja õhu olekuparameetrite andmehõivesüsteemi peale magistritöö kaitsmist edasi arendada.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva energiakasutuse magistriõppe lõputöö teemaks oli „Andmehõivesüsteem täppispõllumajanduses“. Töös lahendati nii andmehõivesüsteemi tarkvaraline kui ka raudvaraline pool. Teoreetilises osas kirjeldatakse täppispõllumajanduse olulisust põllumajanduses ja tuuakse välja milliseid tehnoloogiaid on hetkel maailmas kasutusel. Viidi läbi turu-uuring, kus tutvuti lähemalt nelja põllumajanduslikku andmehõivesüsteemiga, mis on suutelised mõõtma mulla- ja õhu olekuparameetreid. Tutvutud süsteemideks on Trellis, Sensoterra, EnviroMonitor ja CropX. Neist neljast peab töö autor kõige funktsionaalsemaks EnviroMonitor süsteemi, eelkõige tänu heale levikaugusele ja laiale andurite valikule. Kõigi nelja andmehõivesüsteemi negatiivseks küljeks on kõrge turu hind.

Valminud süsteem koosneb viiest eraldi seisvast seadmest. Nendeks on kolm andurjaama, tugijaam ja keskseade. Seadmed suhtlevad omavahel kasutades raadiosidet. Raadioside on loodud tuginedes moodulile HC-12. Raadiosidevõrk on ülesse ehitatud puutopoloogia põhimõtteid kasutades. Andurjaamade ja tugijaama controlleriks valiti Arduino Pro Mini, eelkõige tänu tema kompaktsale disainile ja väiksele energiatarbele. Keskseadmeks on turul uudne ja sobiva võimsusega arendusplaat Lattepanda.

Andurjaama kujundamisel seati ülesanneteks, et seade peab olema suuteline mõõtma kolme erinevat temperatuuri- ja mulla niiskuseanduri väärtust, töötama patareitoitel ühe vegetatsiooniperioodi, suutma andmeid edastada tugijaama võimalikult kauge vahemaa tagant kasutades selleks taskukohase hinnaga raadiosidemoodulit ja olema võimalikult kompaktne. Neile eesmärkidele tuginedes valiti andurjaama temperatuurianduriteks hermeetiliselt kaetud DS18B20 ja niiskuseanduriteks SEN0193. Andurjaama energiaga varustamiseks valiti kaks patareid EVE ER14505. Kahe patareiga suudab andurjaam teoreetiliselt töötada 56818 tsüklit. Iga tsükli pikkus on 901,7 sekundit ehk patareidel on andurjaam suuteline töötama 593 päeva. Läbiviidud katsetes tulemusena saavutati valituks osutunud raadiosidemooduliga HC-12 püsiv suhtlus 600 meetri kauguselt. Andurjaam paigaldati 40x65x115 mm veekindlasse karpi. Andurjaama valmistamiseks vajalike detailide hinnaks kujunes 45,5 eurot.

Tugijaam on suuteline vahendama infot andurjaamade ja keskseadme vahel. Lisandväärtusena võimaldab tugijaam paigaldada andurjaamad keskseadmest kaugemale kui 600 meetrit. Tugijaam on lülitatud tööhetkel stabiilsesse toitevõrku. Andurjaamadest saabuvatele infopakettidele lisab tugijaam anduriga DHT22 mõõdetud õhuniiskuse väärtuse. Häirete vältimiseks suhtleb tugijaam andurjaamadega ja keskseadmega erinevatel sagedustel. Tugijaama valmistamiseks vajalike detailide hinnaks kujunes 14,2 eurot.

Keskseade salvestab kõik saabunud infopakettid ja töötleb neid lõputöö raames valminud programmiga. Programm on kasutajale visuaalne töövahend, kuvades kõik saabunud andmed reaalsajas graafikutena. Kasutajaliidese valmistamiseks kasutati vabavaralist programmeerimistarkvara Python. Reaalaja graafikud kuvavad viimase 24 tunni andmed. Lisaks on kasutajal võimalus kasutajaliidese abil graafikuna kuvada kõiki andmehõivesüsteemi poolt kogutud andmed eraldi. Keskseadme valmistamiseks vajalike detailide hinnaks kujunes 114,6 eurot.

Andmehõivesüsteemi katsetati ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Andurjaamad paigaldati 100 meetri raadiusesse tugiseadmest. Üks andurjaamadest paigaldati katse tulemuste variatsioonide suurendamiseks kasvuhoonesse ja teised kaks välistingimustesse. Katse käigus ilmnisid andurjaamade töös nende paigaldamisel üksikud tõrked. Üheks tõrke allikaks oli ebakvaliteetsed ühendused jaama toitesüsteemis, mis viisid tarkvara seiskumiseni. Teiseks analüüsimist nõudvaks nähtuseks olid mulla niiskusandurite SEN0193, laiades piirides muutuvad mõõtetulemused, vihmasel perioodi. Vihmase perioodi lõppemisel olid tulemused jälle usaldusväärsed. Katsete tulemusena tõdeti, et andurjaamad on rahuldavalt suutelised töötama väliskeskkonnas ja andma kasutajale reaalsajas infot õhu ja mulla olekuparameetrite kohta. Nende teadmistele tuginedes on taimekultuure võimalik efektiivsemalt kasvatada.

Projekti eesmärgiks olnud andmehõivesüsteemi projekteerimine ja lisaks ka valmistamine õnnestusid täies mahus ja seatud eesmärgid said täidetud. Töö autor leiab, et kavandatud süsteemil on mitmeid edasiarendus võimalusi. Näiteks valmistada andurjaamale lokaalne infosalvestamise võimalus või kavandada andmehõivesüsteemile juurde häiresüsteem, mis saadaks kasutajale hädavajalikku informatsiooni.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Schrijver, R.** (2016). Precision agriculture and the future of farming in europe. Teaduslike ja tehnoloogiliste valikute hindamise üksus. [on-line] [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS\\_STU\(2016\)581892\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_EN.pdf) (01.05.2018)
2. Precision agriculture: an opportunity for eu farmers - potential support with the cap 2014-2020. (2016). Euroopa Komisjoni Teadusuuringute Ühiskeskus. [on-line] [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI\\_NT%282014%29529049\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT%282014%29529049_EN.pdf) (01.05.2018)
3. Cereal yield (kg per hectare). (2016). The World Bank [on-line] <https://data.worldbank.org/indicator/ag.yld.crel.kg> (01.05.2018)
4. Land under cereal production (hectares). (2016). The World Bank [on-line] <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.CREL.HA> (01.05.2018)
5. **Gawali, Y., Chaundhari, D.** (2016). Wireless andur network based monitoring for agricultural system. *International Journal of Science*, 5(8), lk 2645-2649 [e-ajakiri] <https://pdfs.semanticscholar.org/1101/cd455c2599752304d2904fe3e7d946309db8.pdf> (01.05.2018)
6. Internet of Things: Wireless Andur Networks. (2014). IEC rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon (IEC). [on-line] <http://www.iec.ch/whitepaper/internetofthings/> (01.05.2018)
7. **Sohraby, K., Minoli, D, Znati, T.** (2007). Wireless andur networks: Technology, Protocols, and Applications. *John Wiley & Sons*. [on-line] [http://www.tfb.edu.mk/amarkoski/WSN/Kniga-w02\\_](http://www.tfb.edu.mk/amarkoski/WSN/Kniga-w02_) (01.05.2018)
8. **Senouci, M., Mellouk, A., Senouci, M., Oukhellou, L.** (2014). Belief Functions in Telecommunications and Network Technologies: An Overview. *Annals of telecommunications*. 69. Lk 135-145. [e-ajakiri] [https://www.researchgate.net/figure/A-typical-WSN-architecture\\_fig2\\_265396190](https://www.researchgate.net/figure/A-typical-WSN-architecture_fig2_265396190) (01.05.2018)
9. **Repan, V.** (2012). Juhtmevaba silmvõrk. [on-line] [http://e-ope.khk.ee/oo/votepren/juhtmevaba\\_silmvork/vrkude\\_liigitamine\\_nende\\_ehituse\\_phjal\\_t\\_opoloogia\\_protokoll\\_arhitektuur.html](http://e-ope.khk.ee/oo/votepren/juhtmevaba_silmvork/vrkude_liigitamine_nende_ehituse_phjal_t_opoloogia_protokoll_arhitektuur.html) (01.05.2018)
10. **Sjarma, D., Verma, S., Sharma, K.** (2013). Network topologies in wireless andur networks: A review. *Ijct*, 4(3), lk 93-97.[on-line] <http://www.ijct.org/vol4/sp13/c0116.pdf> (01.05.2018)
11. **Dargie, W., Poellabauer, C.** (2010). Fundamentals of wireless andur networks: Theory and practice. *John Wiley & Sons*. [on-line] <https://pdfs.semanticscholar.org/e87f/5253451603be6ef1b5d56700ed8048a33d61.pdf> (01.05.2018)
12. **Karl, H., Willig, A.** (2005). Protocols and architectures for wireless andur networks. *John Wiley & Sons*. [on-line] <http://profsite.um.ac.ir/~hyaghmae/ACN/WSNbook.pdf> (01.05.2018)
13. **Buchen, L., Snow, A.** (2018) MyTrellis: Intelligence platform. [on-line] [https://mytrellis.com/intelligence-platform\\_](https://mytrellis.com/intelligence-platform_) (01.05.2018)
14. Sensoterra koduleht. (2018).[on-line] <http://www.sensoterra.com/technology/> (01.05.2018)
15. Lo-Ra tugijaam. (2018). [on-line] <https://shop.thethingsnetwork.com/index.php/product/the-things-gateway/> (01.05.2018)
16. Enviromonitor koduleht. (2018). [on-line] <https://www.davisnet.com/solution/enviromonitor-affordable-field-monitoring-system/#components-pricing> (01.05.2018)
17. CropX koduleht. (2018). [on-line] <https://support.cropx.com/hc/en-us/articles/115003660769-Andur-Technical-Specifications> (01.05.2018)

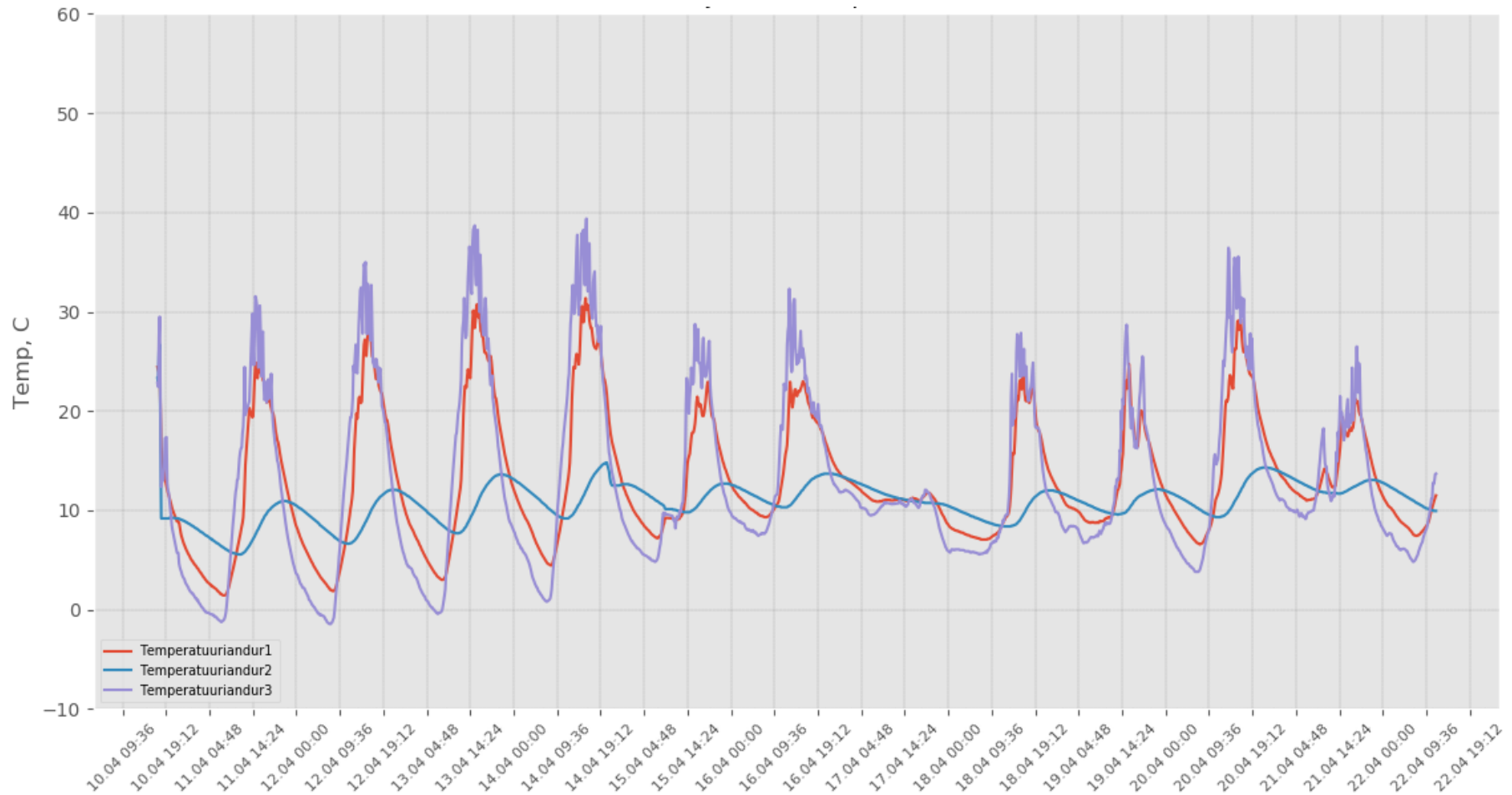
18. **Keppart, L. Kadaja, J.** (2017) "Ilmastikutingiuste analüüs," [online], [https://www.envir.ee/sites/default/files/vaetiste\\_laotamise\\_optimaalse\\_sugisese\\_ajalise\\_pii\\_rangu\\_eksperthinnang.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/vaetiste_laotamise_optimaalse_sugisese_ajalise_pii_rangu_eksperthinnang.pdf) (27.03.2018)µ
19. Irrrometer koduleht. (2018). Understanding soil moisture. [on-line] <http://www.irrometer.com/basics.html> (01.05.2018)
20. HC-12 wireless rf uart communication module v2.4 user manual. (2016). [on-line] [http://statics3.seeedstudio.com/assets/file/bazaar/product/HC12\\_english\\_datasheets.pdf](http://statics3.seeedstudio.com/assets/file/bazaar/product/HC12_english_datasheets.pdf) (01.05.2018)
21. Arduino Pro Mini koduleht. (2018). Arduino. [on-line] <https://store.arduino.cc/arduino-pro-mini> (01.05.2018)
22. Pingeregulaatori seeria LM78LXX andmeleht. (2016). Texas Instruments. [on-line] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm78l.pdf> (01.05.2018)
23. Power MOSFET IRL540 andmeleht. (2011). Vishay Siliconix. [on-line] <https://www.vishay.com/docs/91300/91300.pdf> (01.05.2018)
24. Reaalajakella DS3231 andmeleht. (2015). Maxim Integrated. [on-line] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf> (01.05.2018)
25. SEN0193 andeleht. (2018). DFRobot. [on-line] [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/SEN0193\\_Web.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/SEN0193_Web.pdf) (01.05.2018)
26. **Carpena, R. D.** (2016). Soil Moisture Andur Introduction. Alliance for Water Efficiency.[on-line] <http://www.allianceforwaterefficiency.org/1Column.aspx?id=1146&LangType=1033&terms=soil+moisture> (01.05.2018)
27. Soil Moisture Measurement Instrumentation. (2018). ICT International. [on-line] <http://www.ictinternational.com/casestudies/soil-moisture-measurement-instrumentation/> (01.05.2018)
28. DS18B20 andmeleht. (2015). Maxim Integrated. [on-line] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (01.05.2018)
29. **Sell R.** (2015) Pingejagur. [on-line] [http://home.roboticlab.eu/et/electronics/voltage\\_divider](http://home.roboticlab.eu/et/electronics/voltage_divider) (01.05.2018)
30. Raadiosageduste kasutamise tingimused ja tehnilised nõuded sagedusloast vabastatud raadioseadmetele. (vastu võetud 28.10.2008, muudetud, täiendatud, viimasti jõustunud 08.11.2008 ) – Riigiteataja <https://www.riigiteataja.ee/akt/13304540> (01.05.2018)
31. CC1101 andmeleht. (2018). Texas Instruments [on-line] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf> (01.05.2018)
32. SPI library. (2018). Arduino. [on-line] <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>
33. NRF24L01 andmeleht. (2008). Sparkfun. [on-line] [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf) (01.05.2018)
34. DRF1278F andmeleht. (2018). Semtech Corporation [on-line] <http://www.dorji.com/docs/data/DRF1278F.pdf> (01.05.2018)
35. 433 MHz raadioside komplekti andmeleht. (2018). [on-line] [http://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/433Mhz\\_RF-TX&RX.pdf](http://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/433Mhz_RF-TX&RX.pdf) (01.05.2018)
36. **Watson, B.** (1980). FSK: Signals and Demodulation. *WJ Tech Notes*. 7(5). lk 1-13. [on-line] <http://edge.rit.edu/edge/P09141/public/FSK.pdf> (01.05.2018)
37. EVE ER14505 andmeleht. (2010). Farnell. [on-line] <http://www.farnell.com/datasheets/1445884.pdf> (01.05.2018)
38. DHT22 andmeleht.(2018). Aosong Electronics Co.,Ltd. [on-line] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Andurs/Temperature/DHT22.pdf> (01.05.2018)
39. LattePanda koduleht.(2018). LattePanda. [on-line] <http://docs.lattepanda.com/> (01.05.2018)
40. Matplotlib koduleht. (2018). Installation. [on-line] <https://matplotlib.org/> (01.05.2018)
41. TkInter manul.(2018). Wiki-Python. [on-line] <https://wiki.python.org/moin/TkInter> (01.05.2018)

42. Trükkplaat ühepoolne. (2018). Oomipood. [on-line]  
[https://www.oomipood.ee/product/lam160x233e1\\_5\\_trukkiplaat\\_1\\_poolne\\_160\\_233mm\\_laminaat\\_0\\_1\\_5mm\\_35um](https://www.oomipood.ee/product/lam160x233e1_5_trukkiplaat_1_poolne_160_233mm_laminaat_0_1_5mm_35um) (01.05.2018)
43. 3-ne kruviklemmi hind. (2018). Oomipood. [on-line]  
[https://www.oomipood.ee/product/tl201r\\_3pkc\\_kruviklemm\\_3ne\\_plaadile\\_nurk\\_5mm](https://www.oomipood.ee/product/tl201r_3pkc_kruviklemm_3ne_plaadile_nurk_5mm) (01.05.2018)
44. 20-ne piikriba hind. (2018). Oomipood. [on-line]  
[https://www.oomipood.ee/product/l20420gs\\_1\\_20pin\\_2\\_54mm\\_piikriba\\_pesa\\_plaadile?q=piikriba%20pesa](https://www.oomipood.ee/product/l20420gs_1_20pin_2_54mm_piikriba_pesa_plaadile?q=piikriba%20pesa) (01.05.2018)
45. HC-12 hind. (2018). Aliexpress. [on-line] <https://www.aliexpress.com/item/HC-12-SI4463-wireless-microcontroller-serial-433-long-range-1000M-with-antenna-for-Bluetooth/32367661641.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.QEj1vW> (01.05.2018)
46. DS3231 hind. (2018). Aliexpress. [on-line] <https://www.aliexpress.com/item/DS3231-AT24C32-IIC-High-Precision-RTC-Module-Clock-Timer-Memory-Module/2037934408.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.QEj1vW> (01.05.2018)
47. Arduino Pro mini 8 MHz hind. (2018). Aliexpress. [on-line]  
<https://www.aliexpress.com/item/WAVGAT-Atmega328-3-3V-Version-Pro-Mini-Module-16M-For-Arduino-Compatible/32820596876.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.pUjm68> (01.05.2018)
48. IRL540n hind. (2018). Oomipood. [on-line]  
[https://www.oomipood.ee/product/irl540npbf\\_irl540npbf\\_n\\_fet\\_100v\\_30a\\_94w?q=IRL540n](https://www.oomipood.ee/product/irl540npbf_irl540npbf_n_fet_100v_30a_94w?q=IRL540n) (01.05.2018)
49. DS18B20 hind. (2018). Aliexpress. [on-line]  
<https://www.aliexpress.com/item/MK00241-Stainless-steel-waterproof-package-type-DS18B20-temperature-probe-temperature-andur-18B20/32658611153.html> (01.05.2018)
50. SEN0193 hind. (2018). Aliexpress. [on-line] <https://www.aliexpress.com/item/NEW-Capacitive-soil-moisture-andur-not-easy-to-corrode-wide-voltage-wire-for-arduino/32832538686.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.Fy5tJV> (01.05.2018)
51. LM78L05ACMX hind. (2018). Oomipood. [on-line]  
[https://www.oomipood.ee/product?product\\_id=1045847](https://www.oomipood.ee/product?product_id=1045847) (01.05.2018)
52. EVE ER14505 hind. (2018). Akuladu. [on-line] <https://www.akuladu.ee/e-pood/patareid-3/liitium-18/36v-62/liitium-eve-er14505-std-aa-8933-detail.html> (01.05.2018)
53. Plastikkarp 40x65x115 hind. (2018). Oomipood. [on-line]  
[https://www.oomipood.ee/product/box\\_g304\\_plastikkarp\\_veekindel\\_40\\_65\\_115mm](https://www.oomipood.ee/product/box_g304_plastikkarp_veekindel_40_65_115mm) (01.05.2018)
54. DHT22 hind. (2018). Aliexpress. [on-line] <https://www.aliexpress.com/item/1pcs-DHT22-digital-temperature-and-humidity-andur-Temperature-and-humidity-module-AM2302-replace-SHT11-SHT15/32316036161.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.93RMSf> (01.05.2018)
55. Lattepanda 2GB/32GB hind. (2018). DFRobot. [on-line]  
<https://www.dfrobot.com/product-1405.html> (01.05.2018)
56. Lattepanda kaitseümbrise hind. (2018). Aliexpress. [on-line]  
<https://www.aliexpress.com/item/DFRobot-100-Original-Acrylic-PMMA-Case-Shell-Enclosure-Transparent-color-for-LattePanda-2G-32GB-4G-64GB/32721614307.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.KwDN8N> (01.05.2018)
57. Ilmajaam WS1080. (2018). Ronex OÜ. [on-line]  
[http://www.ronex.ee/Tootekataloog/Ilmajaamad/puutetundliku\\_tabloo\\_ja\\_arvutiliidesega\\_ilmajaam\\_ws1080](http://www.ronex.ee/Tootekataloog/Ilmajaamad/puutetundliku_tabloo_ja_arvutiliidesega_ilmajaam_ws1080) (01.05.2018)



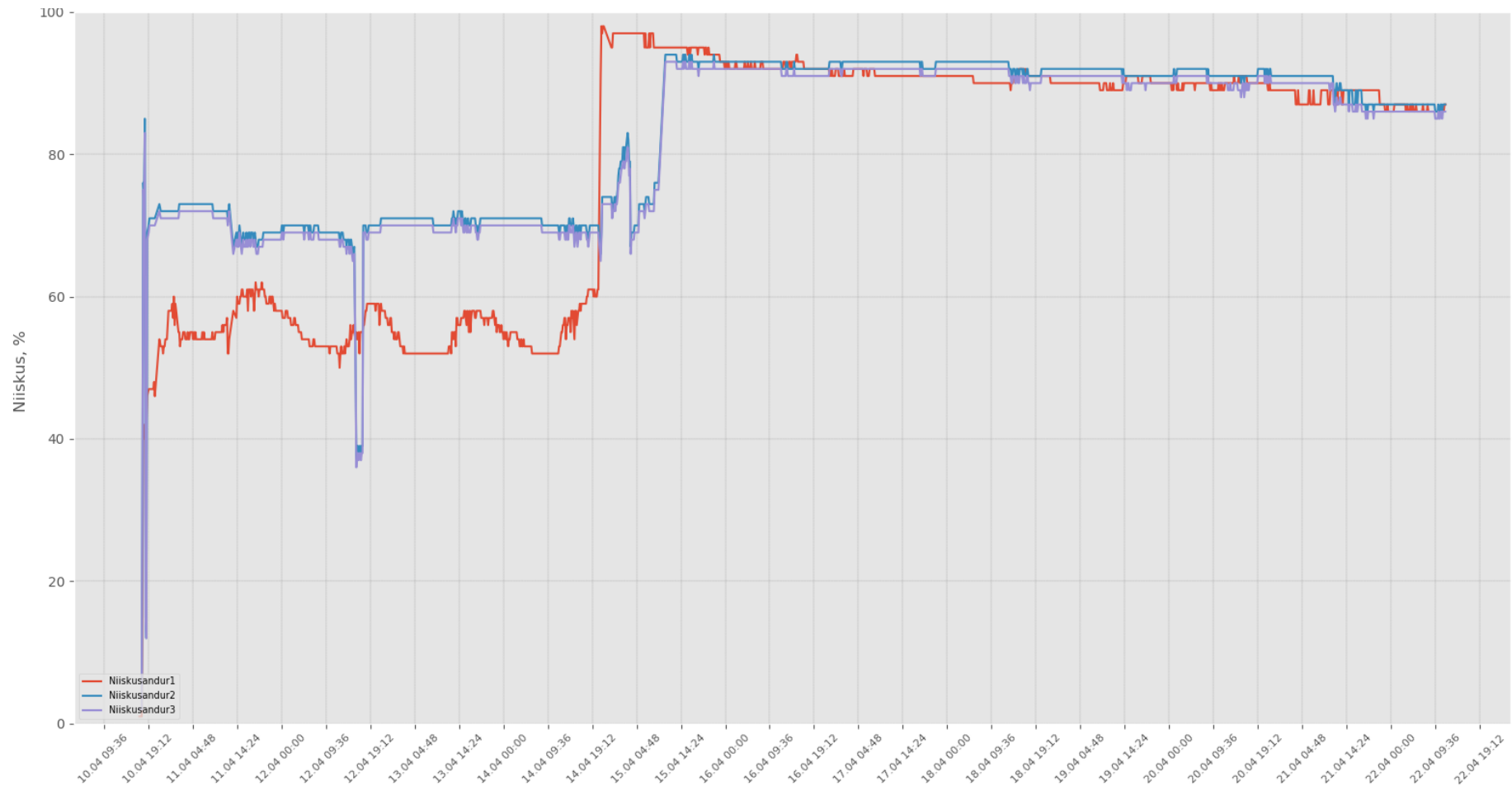
**LISAD**

### Lisa A. Temperatuuriandmed andurjaamast 1 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018



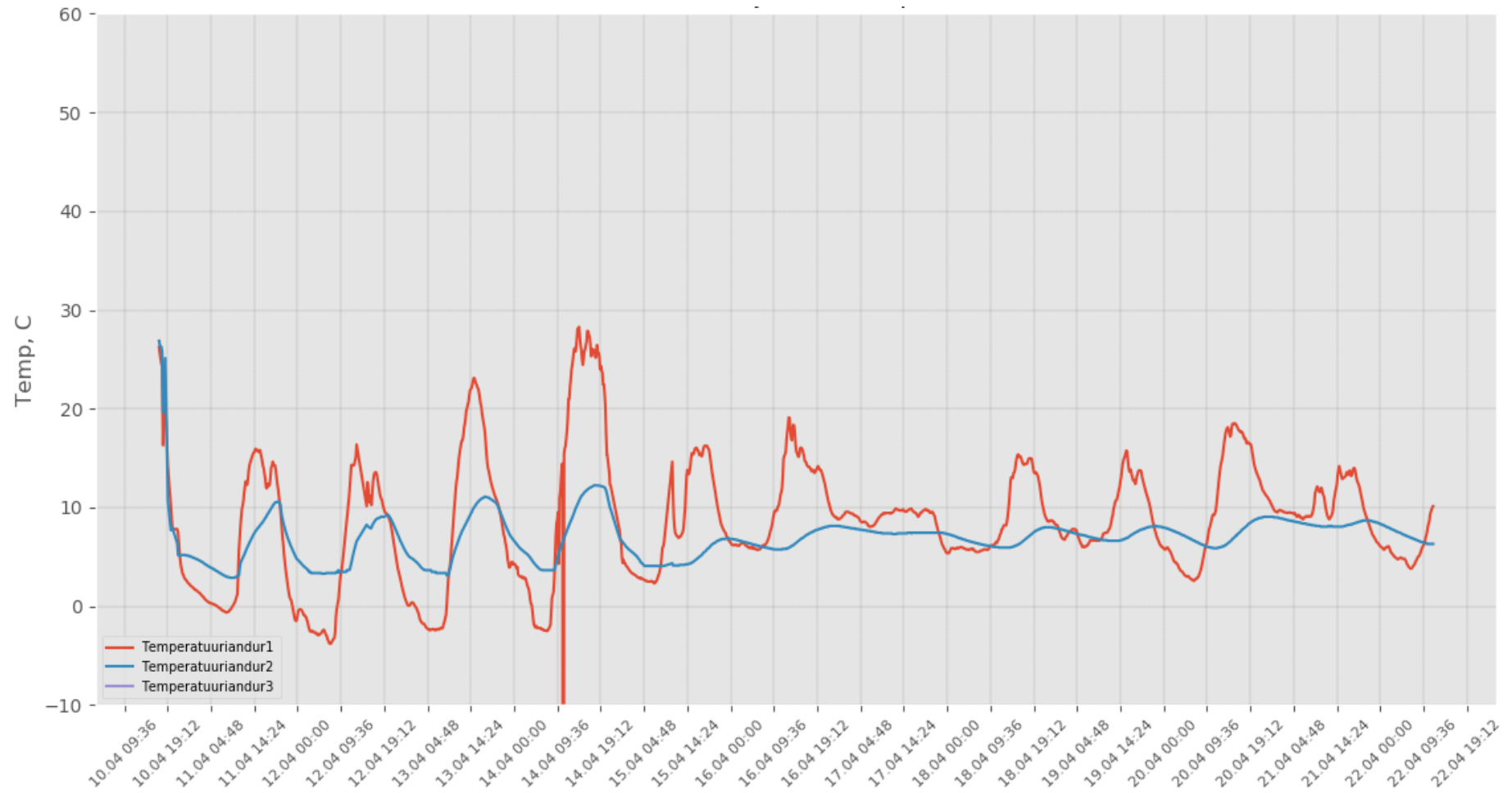
**Joonis A.1.** Temperatuuriandmed andurjaamast 1 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Temperatuuriandur 1 paikneb välisõhu käes, temperatuuriandur 2 paikneb mulla sees 0,2 m sügavusel ja temperatuuriandur 3 paikneb andurjaama korpuses.

### Lisa B. Mulla niiskuse andmed andurjaamast 1 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018



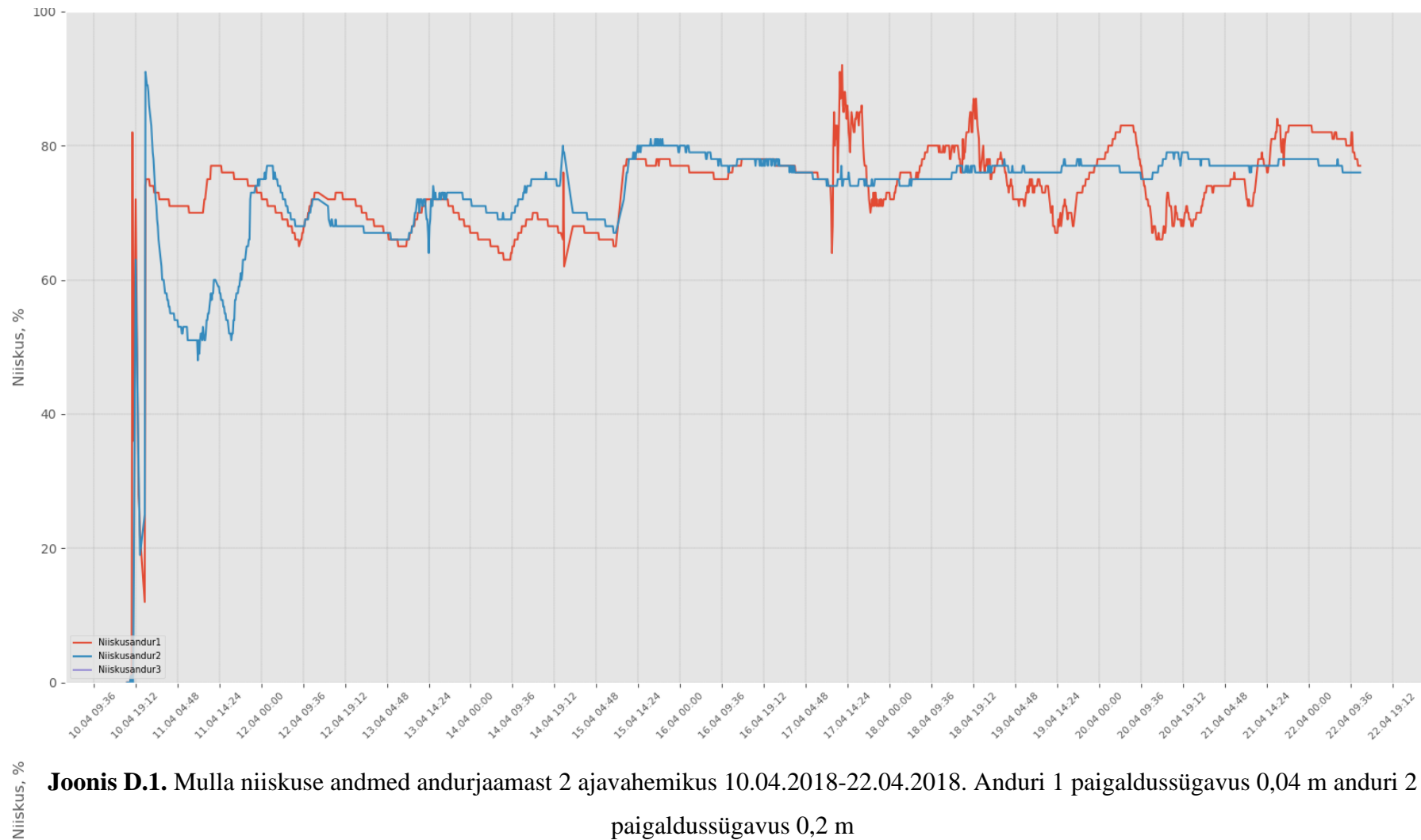
**Joonis B.1.** Mulla niiskuse andmed andurjaamast 1 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Anduri 1 paigaldussügavus 0,2 m andurite 2 ja 3 paigaldussügavus 0,04 m.

### Lisa C. Temperatuuriandmed andurjaamast 2 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018

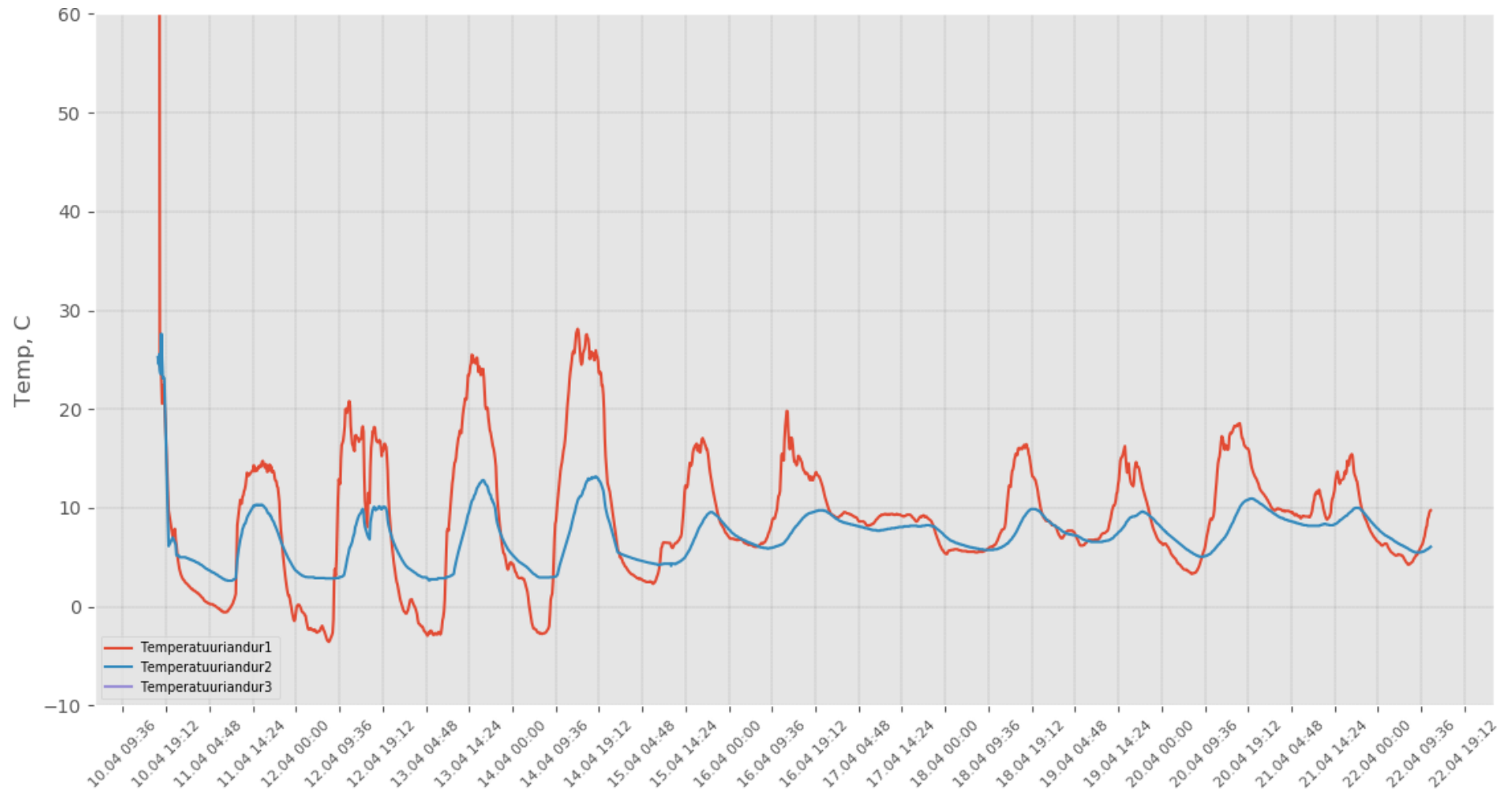


**Joonis C.1.** Temperatuuri andmed andurjaamas 2 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Temperatuuriandur 1 paikneb välisõhu käes, temperatuuriandur 2 paikneb mulla sees 0,2 m sügavusel.

## Lisa D. Mulla niiskuse andmed andurjaamast 2 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018

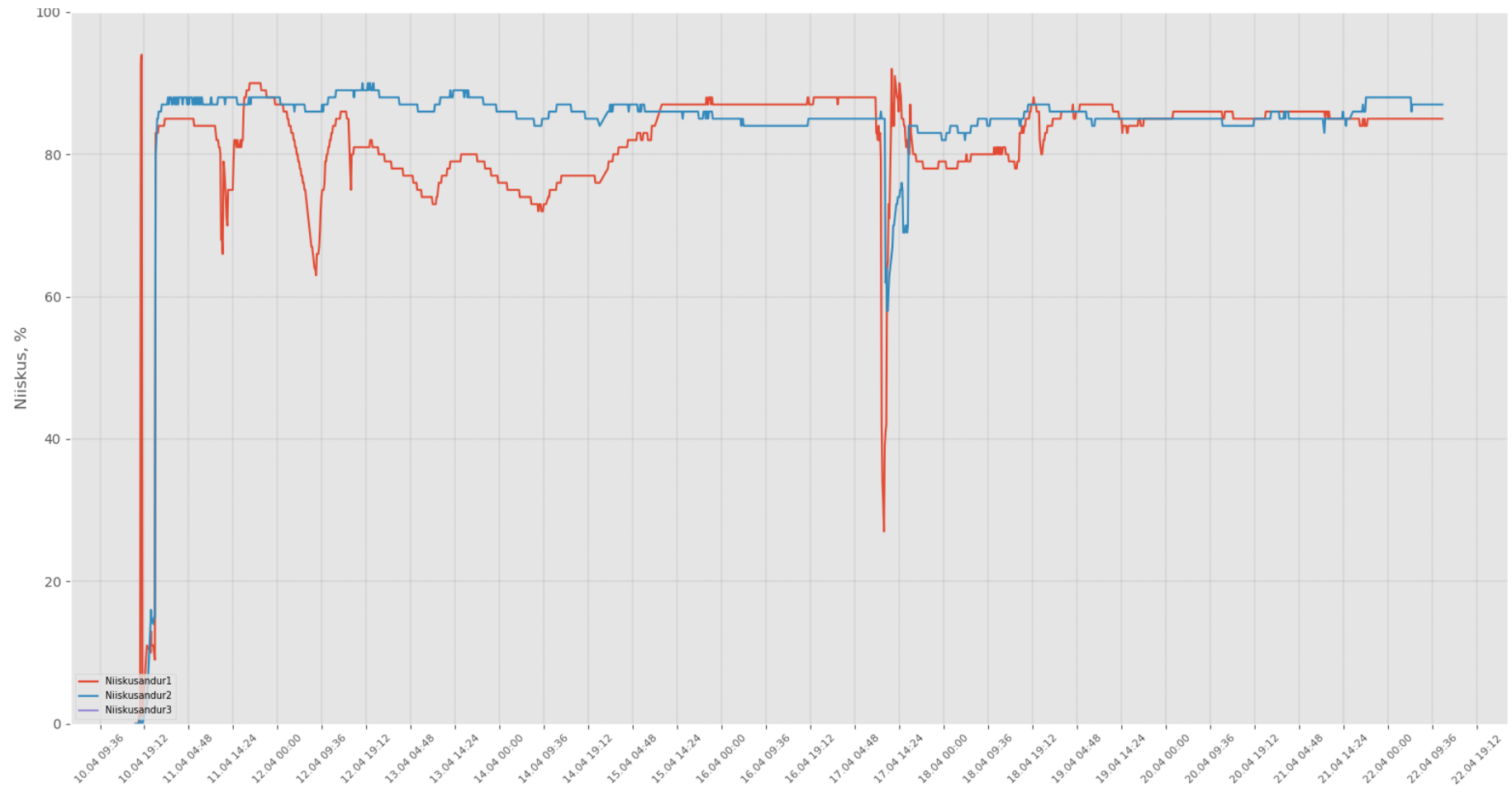


**Lisa E. Temperatuuriandmed andurjaamast 3 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018**



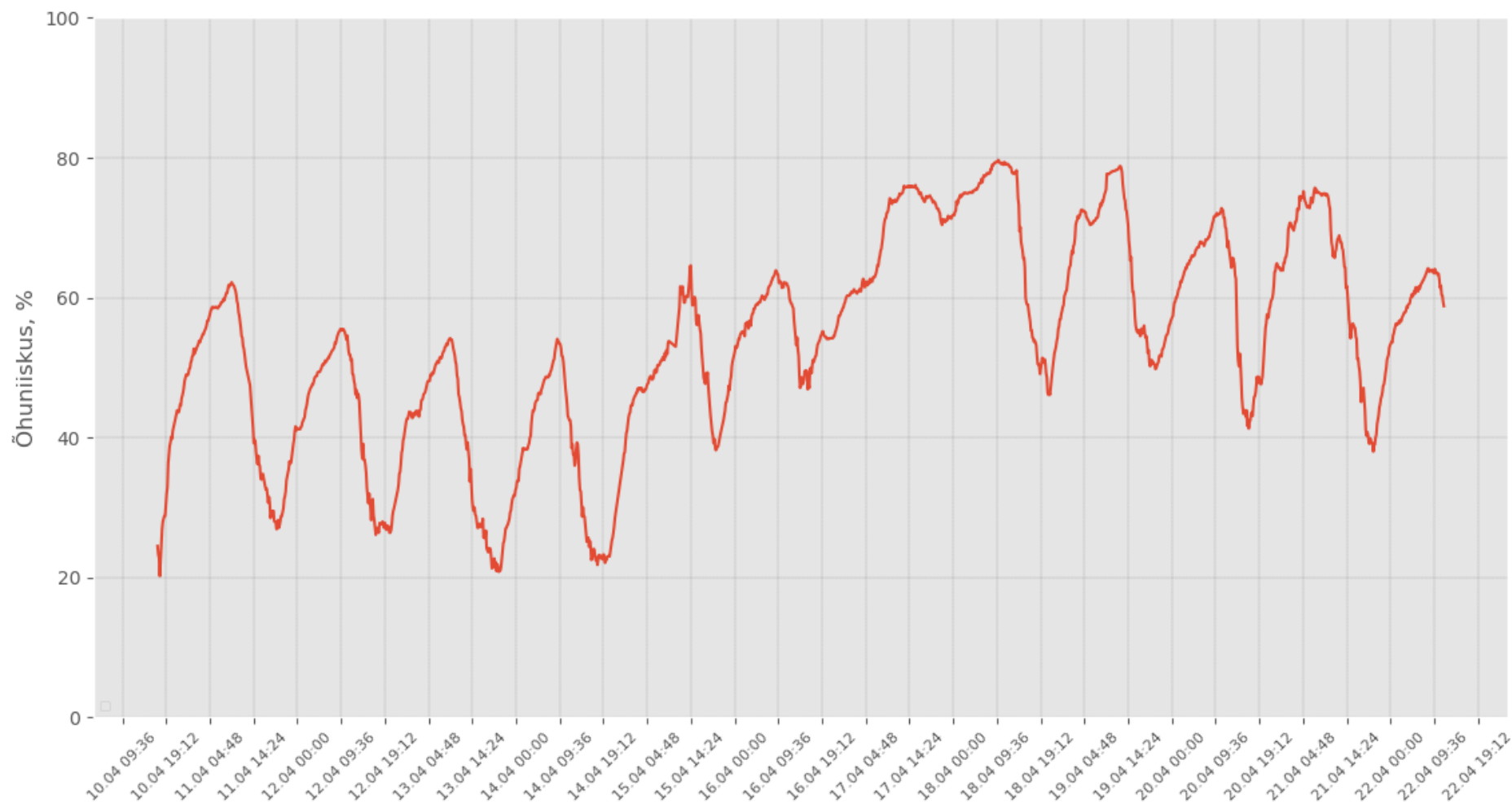
**Joonis E.1.** Temperatuuriandmed andurjaamast 3 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Temperatuuriandur 1 paikneb välisõhu käes, temperatuuriandur 2 paikneb mulla sees 0,2 m sügavusel.

### Lisa F. Mulla niiskuse andmed andurjaamast 3 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018



**Joonis F.1.** Mulla niiskuse andmed andurjaamast 3 ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018. Anduri 1 paigaldussügavus 0,04 m anduri 2 paigaldussügavus 0,2 m

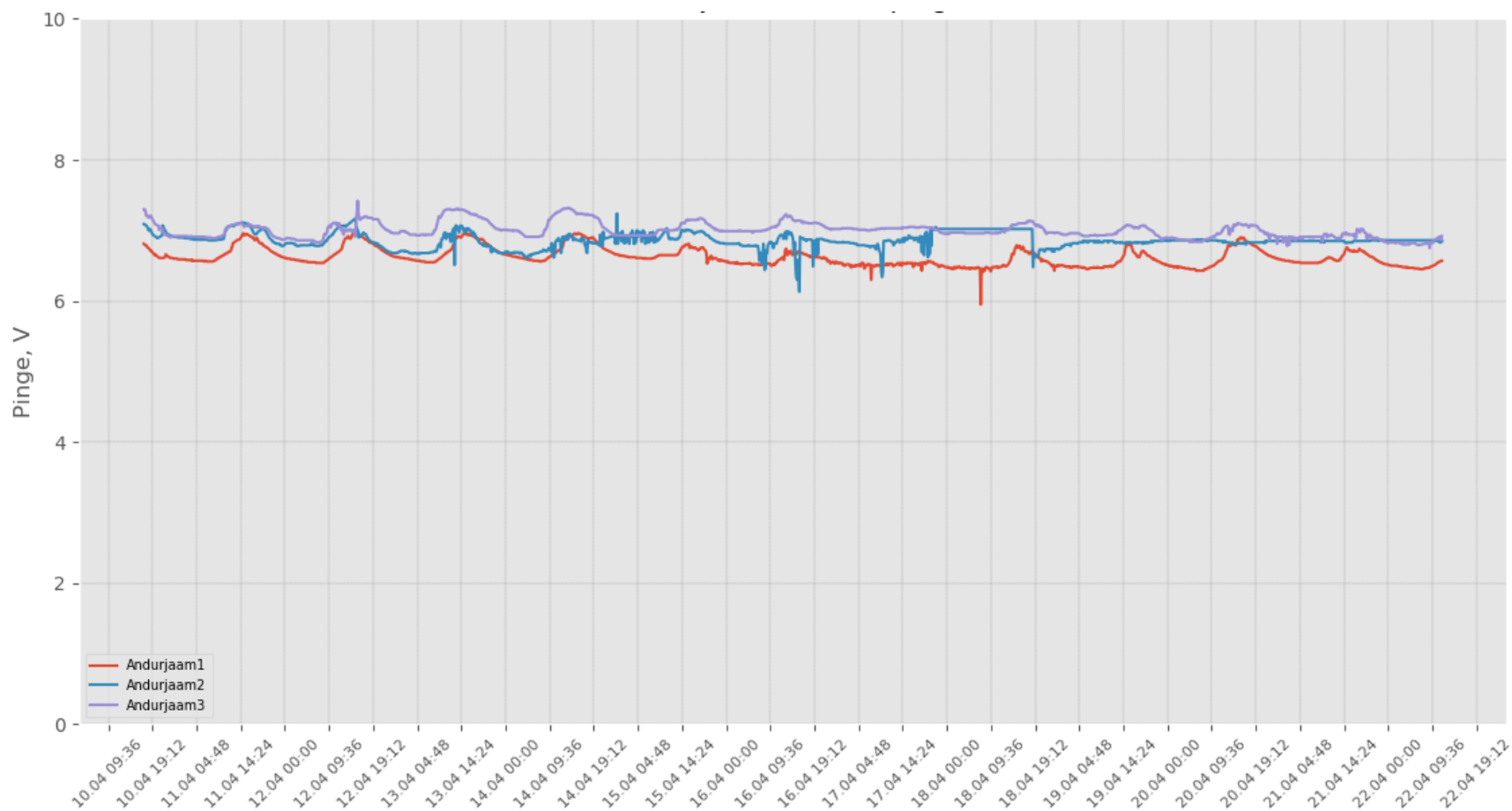
**Lisa G. Mõõdetud õhuniiskuse andmed ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018**



**Joonis G.1.** Tugijaama mõõdetud õhuniiskuse näidud ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018



## Lisa H. Andurjaamade toitepinged ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018



**Joonis H.1.** Andurjaamade toitepinged ajavahemikus 10.04.2018-22.04.2018

**Lisa I. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Riivo Mets,

(*autori nimi*)

sünniaeg 30.08.1994,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö  
Andmehõivesüsteem täppispõllumajanduses,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on Veli Palge,

(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_

(*allkiri*)

Tartu, \_\_\_\_\_

(*kuupäev*)

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

\_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)